

8-6-01
#4

PATENT APPLICATION

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re application of

Hikaru KOUTA, et al.

Appln. No.: 09/788,621

Confirmation No.: 4578

Filed: February 21, 2001

For: METHOD FOR MODIFYING REFRACTIVE INDEX IN OPTICAL WAVE-GUIDE
DEVICE



Group Art Unit: 2874

Examiner: Unknown

SUBMISSION OF PRIORITY DOCUMENT

Commissioner for Patents
Washington, D.C. 20231

Sir:

Submitted herewith is a certified copy of the priority document on which a claim to priority was made under 35 U.S.C. § 119. The Examiner is respectfully requested to acknowledge receipt of said priority document.

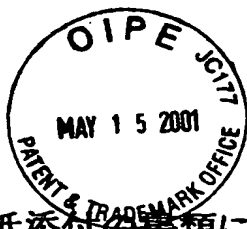
Respectfully submitted,

SUGHRUE, MION, ZINN,
MACPEAK & SEAS, PLLC
2100 Pennsylvania Avenue, N.W.
Washington, D.C. 20037-3213
Telephone: (202) 293-7060
Facsimile: (202) 293-7860

J. Frank Osha
Registration No. 24,625

Enclosures: Japanese 2000-044298

Date: May 15, 2001



日本国特許庁
PATENT OFFICE
JAPANESE GOVERNMENT

H. Kouta et al.
09/788,621
Filed 2/21/01
Q63282
10f1

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日

Date of Application:

2000年 2月22日

出願番号

Application Number:

特願2000-044298

出願人

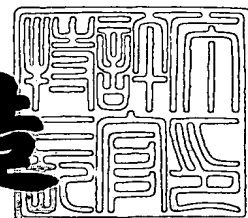
Applicant(s):

日本電気株式会社

2000年12月 1日

特許庁長官
Commissioner,
Patent Office

及川耕造



出証番号 出証特2000-3098029

【書類名】 特許願

【整理番号】 34601517

【提出日】 平成12年 2月22日

【あて先】 特許庁長官 近藤 隆彦 殿

【国際特許分類】 G02B 06/08

【発明の名称】 光導波路デバイスの屈折率の修正方法、屈折率修正装置
、及び光導波路デバイス

【請求項の数】 17

【発明者】

 【住所又は居所】 東京都港区芝五丁目 7 番 1 号 日本電気株式会社内

 【氏名】 古宇田 光

【発明者】

 【住所又は居所】 東京都港区芝五丁目 7 番 1 号 日本電気株式会社内

 【氏名】 賣野 豊

【特許出願人】

 【識別番号】 000004237

 【氏名又は名称】 日本電気株式会社

【代理人】

 【識別番号】 100096231

 【弁理士】

 【氏名又は名称】 稲垣 清

 【電話番号】 03-5295-0851

【手数料の表示】

 【予納台帳番号】 029388

 【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

 【物件名】 明細書 1

 【物件名】 図面 1

 【物件名】 要約書 1

特 2 0 0 0 - 0 4 4 2 9 8

【包括委任状番号】 9303567

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 光導波路デバイスの屈折率の修正方法、屈折率修正装置、及び光導波路デバイス

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 光導波路デバイスの屈折率を修正する方法であって、

30ピコ秒以下のパルス幅を持つ超短パルスレーザ光を光導波路のコア部分に照射して、コア部分の屈折率を変化させることを特徴とする光導波路デバイスの屈折率の修正方法。

【請求項 2】 照射する超短パルスレーザ光の光子のエネルギーが、光導波路デバイスのクラッド部分の物質のバンドギャップ・エネルギーの $1/2$ 以下であることを特徴とする請求項 1 に記載の光導波路デバイスの屈折率の修正方法。

【請求項 3】 超短パルスレーザ光を照射して、光導波路の屈折率を修正する際、コア部分の少なくとも一部分に波長 349nm 以上の長さの超短パルスレーザ光を集光し、クラッド部分の屈折率を変化させることなく、コア部分の少なくとも一部分の屈折率を変化させることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の光導波路の屈折率の修正方法。

【請求項 4】 超短パルスレーザ光を照射して、光導波路の屈折率を修正する際、コア部分及びコア部分の近傍領域のクラッド部分に超短パルスレーザ光を集光し、コア部分の近傍領域のクラッド部分の屈折率をコア部分の屈折率と共に変化させることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の光導波路デバイスの屈折率の修正方法。

【請求項 5】 導波路のコア部分に沿って超短パルスレーザ光を照射して屈折率を修正する際、少なくとも 1 回以上走査して照射し、走査回数によって屈折率の変化率を調整することを特徴とする請求項 1 から 4 のうちのいずれか 1 項に記載の光導波路デバイスの屈折率の修正方法。

【請求項 6】 光導波路デバイスの屈折率を修正するコア部分が、2 層以上積層されているか、または、3 次元で形成されている場合には、下部層のコア部分に焦点を合わせて超短パルスレーザ光を照射し、超短パルスレーザ光を照射する方向から見て上部に形成されている光導波路のコア部分の屈折率を変化させる

ことなく、下部層のコア部分の屈折率を変化させることを特徴とする請求項 1 から 5 のうちのいずれか 1 項に記載の光導波路デバイスの屈折率の修正方法。

【請求項 7】 超短パルスレーザー光を照射し、照射部分を高密度化することにより屈折率を大きくすることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の光導波路デバイスの屈折率の修正方法。

【請求項 8】 超短パルスレーザー光を照射し、照射部分を低密度化させ、又は空孔を生じさせることにより屈折率を小さくすることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の光導波路デバイスの屈折率の修正方法。

【請求項 9】 屈折率を修正した後に、光導波路デバイスを熱処理することを特徴とする請求項 1 から 8 のいずれか 1 項に記載の光導波路デバイスの屈折率の修正方法。

【請求項 10】 光導波路デバイスを保持して X 軸、Y 軸、及び Z 軸方向に自在に移動するステージ部と、

30 ピコ秒以下のパルス幅の超短パルスレーザー光を出射するレーザー装置部と、
レーザー装置から出射された超短パルスレーザー光を光導波路デバイスのコア部分に導いて照射させる光学系部と、

ステージ部、レーザー装置部、及び光学系部を内部に固定する筐体と
を備えていることを特徴とする光導波路デバイスの屈折率修正装置。

【請求項 11】 屈折率を修正する光導波路デバイスの入出力端面に結合した光ファイバーから信号光を光導波路デバイスに導入し、光導波路デバイスから出力された信号光の出力値を測定してレーザー装置部にフィードバックし、超短パルスレーザー光の照射条件を調節してコア部分の屈折率変化量を制御する制御系を備え、

光導波路デバイス内に信号光を導波させながら、超短パルスレーザー光を光導波路のコア部分に照射して、屈折率を修正することを特徴とする請求項 10 に記載の光導波路デバイスの屈折率修正装置。

【請求項 12】 コア部分及びクラッド部分が非晶質物質、又はポリマー物質で形成されている光導波路デバイスであって、

請求項 1 から 9 のいずれか 1 項に記載の光導波路デバイスの屈折率の修正方法

によってコア部分の屈折率を修正したことを特徴とする光導波路デバイス。

【請求項 1 3】 シリコン基板上に製膜された厚さ $100\ \mu\text{m}$ 以下のガラス薄膜中に形成された光導波路デバイスであって、

請求項 1 から 9 のいずれか 1 項に記載の光導波路デバイスの屈折率の修正方法によってコア部分の屈折率を修正したことを特徴とする光導波路デバイス。

【請求項 1 4】 $30\ \mu\text{m}$ 以下の間隔で離隔して延在する複数本の光導波路を有する光導波路デバイスであって、

請求項 1 から 9 のいずれか 1 項に記載の光導波路デバイスの屈折率の修正方法によってコア部分の屈折率を修正したことを特徴とする光導波路デバイス。

【請求項 1 5】 コア部分及びクラッド部分がガラス系材料で形成され、かつコア部分が GeO_2 を含まない光導波路デバイスであって、

請求項 1 から 9 のいずれか 1 項に記載の光導波路デバイスの屈折率の修正方法によってコア部分の屈折率を修正したことを特徴とする光導波路デバイス。

【請求項 1 6】 請求項 1 から 9 のいずれか 1 項に記載の光導波路デバイスの屈折率の修正方法によってテーパ状の形状に形成されたコア部分を備えることを特徴とする光導波路デバイス。

【請求項 1 7】 コア部分を伝搬している光を任意の方向に回折させるように、請求項 1 から 9 のいずれか 1 項に記載の光導波路デバイスの屈折率の修正方法によって形成されたグレーティングを備えていることを特徴とする光導波路デバイス。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、光導波路デバイスのコア部分の屈折率を修正する方法、光導波路デバイスの屈折率修正装置、及び光導波路デバイスに関し、更に詳細には、 GeO_2 をドーピングしたシリカガラス系コア部分を備える光導波路デバイス以外にも精度良く適用でき、かつ経済的に光導波路デバイスのコア部分の屈折率を修正する方法、その方法を実施する光導波路デバイスの屈折率修正装置、及びコア部分の屈折率が修正された光導波路デバイスに関するものである。

【 0 0 0 2 】

【従来の技術】

光導波路は、相対的に屈折率の高いコア部分と、屈折率の低いクラッド部分とを重ねた積層構造として構成されており、コア部分とクラッド部分との境界で全反射させつつコア部分内で光を導波する。本明細書で、光導波路デバイスとは、光導波路を備えたデバイスである。

光導波路は、コア部分とクラッド部分の境界で屈折率が急峻に変化しているタイプのステップ型と、コア部分とクラッド部分の境界で屈折率が徐々に又は緩やかに変化しているタイプのグレーデッド型とに大別される。

【 0 0 0 3 】

ステップ型の光導波路の代表的な従来の作製方法は、シリカ系のガラス基板上に酸化ゲルマニウム (GeO_2) 等をドーピングした膜を形成し、リソグラフィとエッチングプロセスによって GeO_2 ドーピング膜をリッジ型に加工し、この上に再度シリカ系ガラスを製膜して、埋め込み型の光導波路を作製する方法である。

また、別の作製方法は、シリコン基板上にシリカガラス及び GeO_2 を含むシリカ系のガラスを積層し、リソグラフィとエッチングプロセスによってコア部分を上部に有するリッジ型光導波路、又はコア部分が内部にある埋め込み型光導波路を作製する方法である。

【 0 0 0 4 】

近年、高分子材料からなるポリマー系の光導波路を作製する方法も開発されており、例えば特開平 1 0 - 2 6 8 1 5 2 号公報に開示されているように、屈折率の異なる膜を製膜して、ガラス系光導波路と同様のプロセスにより平面型の光導波路を作製する。

また、ガラスにイオンを拡散させ、拡散させた部分の屈折率を高めて、その部分をグレーデッド型の光導波路として応用する方法も提案されていて、例えばガラス基板内部の Na^+ を Ag^+ と交換することにより、コア部分の屈折率を高めた光導波路を作製する方法が提案されている。

【 0 0 0 5 】

更には、特開平 9 - 3 1 1 2 3 7 号公報に開示されているように、ピークパワ

ーが 105 W/cm^2 以上でパルス繰り返し周波数が 10 kHz 以上の、基板に対して透明な波長のパルスレーザー光線をガラス基板中に集光して走査することにより、レーザービームが集光された部分の屈折率を連続的に変化させ、ガラス基板内部に、直接、光導波路を作製する方法が、報告されている。

【0006】

ところで、光通信容量を拡大するために、一本の光導波路中に多波長の光を導波させ、その中から特定の波長だけを選択する波長グレーティングや干渉フィルター、或いは各波長の光を分離する波長分波器、方向性結合器等が開発されている。

これらの光導波路デバイスは、光の干渉や回折の作用を利用するため、光導波路の厳密な屈折率の制御が必要となるものの、前述した光導波路の作製方法では、光導波路デバイスの所望の性能を得るために必要とする程度の厳密さで屈折率制御を行うことはできなかった。

そこで、光導波路デバイスの要求仕様を満たすために、光導波路の光を伝搬するコア部分に、エキシマレーザー等による紫外レーザー光を照射して屈折率を高める方法が提案されている。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】

しかし、エキシマレーザー等による紫外レーザー光を照射して屈折率を修正する方法を適用するためには、コア部分がシリカガラスで形成され、しかもコア部分のシリカガラス中に GeO_2 がドーピングされていることが必要であって、その適用が極めて限られるという問題点があった。それは、屈折率が上昇するためには、シリカガラス中の Ge イオンと関連する $\text{Ge E}'$ センターが生じることが必要であるからである（西井、金高、応用物理 68 巻、1999 年、1140～1143 ページ）。

【0008】

紫外レーザー光を用いて、 GeO_2 ドーピングのシリカガラス光導波路の屈折率を修正する従来の方法には、上述の問題に加えて、更に、以下に挙げるようないくつかの問題点があった。

第1の問題点は、屈折率を変化させるために要する紫外レーザー光の照射時間が長いことである。例えば、高出力の紫外光発生レーザーである、波長193 nm、パルスエネルギー60 mJ、パルス繰り返し周波数100 HzのArFエキシマレーザーを用いても、屈折率を0.001だけ変化させるためには、約20分の長い照射時間を要してしまう。

【0009】

第2の問題点は、長時間、紫外レーザー光を照射しても、最大で0.001しか屈折率を変化させることができないこと、つまり屈折率の変化量がある程度で飽和してしまうことである。

従って、紫外光の照射では、屈折率を大きく修正したい場合に対応することが出来ない。

【0010】

第3の問題点は、屈折率は、主として、紫外線によって生じた電子がGeに関連する欠陥にトラップされることにより、変化するので、屈折率の修正後の光導波路デバイスに熱を加えて温度を高くすると、トラップされていた電子が、欠陥から放出され、屈折率が徐々に修正前の屈折率に戻ってしまうことである。

つまり、屈折率を修正したコア部分が熱的に不安定であって、屈折率を修正した後の光導波路デバイスに高温プロセスを施すことはできない。また、温度変動に対する信頼性が低い。

【0011】

第4の問題点は、屈折率を変化させるためには、前述のように、ガラスにGeO₂をドーピングすることが不可欠なことである。

そのため、GeO₂を含まないガラスで作製した光導波路デバイスに紫外光を照射しても、コア部分の屈折率の修正を行うことはできない。

【0012】

第5の問題点は、エキシマレーザー光の集光性が悪いことである。屈折率を変化させたい導波路のコア部分の幅が5 μmから10 μmの狭い幅であるとき、紫外レーザー光源にエキシマレーザー光を用いた場合には、エキシマレーザー光の集光性が悪いために、5 μmから10 μm程度までビームを絞ることが出来ない。

そこで、修正が必要な部分にだけ光が照射されるようなマスクを設ける等の対策を講ずることが必要になり、しかも、光導波路デバイスの導波路間隔が $30\ \mu\text{m}$ よりも狭い場合には、マスクを用いても各導波路を個別に修正することは非常に困難である。

【 0 0 1 3 】

第 6 の問題点は、エキシマレーザを紫外光の光源に用いた場合、レーザ光を発生するためには、ガスを交換することが必要になるので、ランニングコストが高くなり、また、装置も高価で、しかも大型なために、広い設置面積を必要とする等の経済的な不利があることである。

なお、屈折率を変化させるための紫外レーザ光源として、エキシマレーザ以外には、Nd : YAG レーザから発生する $1064\ \text{nm}$ のレーザ光の第 4 高調波である $266\ \text{nm}$ が考えられるが、 $266\ \text{nm}$ では、屈折率を変化させる GeE' の生成確率が非常に小さいため、レーザ光をコア部分に集光しても、屈折率の変化に非常に長時間を必要とするので、実用的でない。

【 0 0 1 4 】

第 7 の問題点は、 GeO_2 をドープしたシリカガラス光導波路以外の光導波路の屈折率を修正できる有効な手法が、まだ、確立されていないことである。

【 0 0 1 5 】

そこで、本発明の目的は、光導波路デバイスのコア部分の屈折率を高精度で修正してデバイス特性を向上させ、また、長期的に信頼性の高い光導波路デバイスを作製するための屈折率の修正方法、屈折率修正装置、及び屈折率を修正した高性能な光導波路デバイスを提供することである。

【 0 0 1 6 】

【課題を解決するための手段】

本発明者は、多数回にわたって種々の実験を行った結果、次のことを見い出した。

既知の方法で形成された光導波路デバイスのコア部分に、パルス幅が 30 ピコ秒以下の超短パルスレーザ光を照射すると、超短パルスレーザ光のエネルギーは、当初、電子に吸収され、電子は熱電子となるが、次いで、熱電子から熱伝達に

関与する格子に熱エネルギーが移動し、物質が加熱される。

殆どの材料において、超短パルスレーザー光のパルス幅が30ピコ以下の場合、各パルスの照射毎に、熱電子のエネルギーが熱伝達に関与する格子に全て移動してしまう前に、又は移動してしまった直後に、パルスの照射は終わってしまうので、電子温度と物質温度が平衡になることはない。しかも、集光領域以外の領域へのレーザー光のエネルギーの拡散が抑制され、集光領域を局所的に加熱することが可能となる。尚、ここでいう格子とは、物質を構成している原子や分子同士の結合を示す。

【0017】

局所的な領域に吸収された光のエネルギー密度が、しきい値を越えてコア部分を構成する物質を変質させると、コア部分を構成している物質の原子、分子の結合状態が変化し、気化、融解、変質、熱膨張等の状態変化が生じる。

これにより、この局所的な領域の内部圧力が急激に上昇する。その後、コア部分を構成する物質が冷却し、組織が再構成されるときには、コア部分は、照射前の状態よりも高密度化される。そして、高密度化により、屈折率が上昇する。

この場合、高密度化される部分の周辺は低密度化されるが、広く分散するため、高密度化される部分の周辺の屈折率の変化量は非常に小さく、実用的には、高密度化される部分の周辺の低密度化を考慮に入れる必要はない。

【0018】

一方、集光部分のレーザー光のパワー密度がコア物質のアブレーションしきい値を大きく越えた場合は、レーザー光を集光した中心部分にあった物質は周囲の物質中に潜り込み、レーザー光を集光した中心部分は低密度化される。更に、レーザー光のエネルギーが高くなると、レーザー光を集光した中心部分は空孔となる。

低密度化された領域の屈折率は下がり、空孔領域の屈折率は1.0となる。低密度化、又は空孔の周囲には高密度化される領域が存在するものの、広く分散するため、屈折率の変化量は小さく、考慮に入れる必要はない。

【0019】

超短パルスレーザー光を照射することにより、高密度化、又は低密度化された部分の屈折率の変化量は、超短パルスレーザー光のエネルギー、パルス繰り返し周波

数、照射時間、パルス数、走査速度、走査回数等を制御することにより、調整することが可能となる。

また、光導波路のコア部分のレーザ光のパワー密度に対する変質しきい値は、コア部分を構成する物質の種類によって異なる。

【0020】

超短パルスレーザ光の波長が、コア部分、及びクラッド部分の短波長側の吸収端よりも短い場合、1光子過程で吸収が生じてしまう。その結果、レーザ光が照射された領域全体に光のエネルギーが吸収されてしまい、集光した焦点近傍だけにエネルギーを集中して吸収させることは出来ない。

しかし、超短パルスレーザ光の波長が、コア部分、及びクラッド部分の短波長側の吸収端よりも長い場合、1光子過程では、コア部分、及びクラッド部分にレーザ光は吸収されないために、レーザ光が集光されて高エネルギー密度となった部分だけに、多光子過程によるレーザ光のエネルギー吸収が生じる。

【0021】

2光子吸収と3光子吸収を比較すると、エネルギー密度が低くても、2光子吸収の方が生じ易い。

3光子吸収が生じる領域を、エネルギー密度の最も高い焦点におけるビーム径と同程度の球状の領域（集光点近傍）とすると、2光子吸収は、3光子吸収が生じる領域から上記ビーム径の10倍以上離れた領域でも生じる。

そのため、2光子吸収の場合は、光をコア部分に集光しても、コア部分の周囲にあるクラッド部分にも光が吸収され、コア部分の周囲の屈折率も変化する確率が高くなる。

3光子以上の吸収過程を用いると、集光点近傍だけにエネルギーを吸収させることが容易となる。従って、コア部分に光を集光すれば、その焦点近傍の部分だけ、屈折率を変化させることが容易になる。

【0022】

また、30ピコ秒以下のパルス幅を持つ照射レーザ光のエネルギーをクラッド部分のバンドギャップ・エネルギーの1/2以下にすれば、2光子吸収ではバンドギャップ・エネルギーを越えないため、3光子吸収により屈折率を変化させる

ことになり、この場合は、集光点近傍の微少な領域の屈折率を変化させることができる。

また、強度プロファイルがガウシアンライクのビームをパルスレーザ光として用いると、照射する光の波長の長さ程度の領域の回折限界近くまで集光でき、屈折率を変化させる部分の大きさを照射する光の波長の長さ以下にすることも可能となる。そのため、導波路間隔が $30\ \mu\text{m}$ 以下の場合でも、各導波路を 1 本ずつ修正することが可能となる。

【0023】

上記目的を達成するために、以上の知見に基づいて、本発明に係る光導波路デバイスの屈折率の修正方法は、光導波路デバイスの屈折率を修正する方法であって、

30ピコ秒以下のパルス幅を持つ超短パルスレーザ光を光導波路のコア部分に照射して、コア部分の屈折率を変化させることを特徴としている。

【0024】

本発明方法で屈折率を修正したコア部分は、紫外レーザ光を照射した場合と同じようなカラーセンターの影響で屈折率が変化する可能性があるが、光導波路デバイスを熱処理することにより、カラーセンターにトラップされていた電子は、価電子帯に戻るため、カラーセンターによる屈折率変化の影響は無くなる。

そして、高密度化、低密度化、又は空孔により修正された屈折率の変化だけが残る。従って、本発明方法で屈折率を修正した光導波路デバイスに熱処理を施すことにより、光導波路デバイスの信頼性を高めることができる。

【0025】

本発明方法を実施するための、本発明に係る屈折率修正装置は、光導波路デバイスを保持してX軸、Y軸、及びZ軸方向に自在に移動するステージ部と、

30ピコ秒以下のパルス幅の超短パルスレーザ光を出射するレーザ装置部と、
レーザ装置から出射された超短パルスレーザ光を光導波路デバイスのコア部分に導いて照射させる光学系部と、

ステージ部、レーザ装置部、及び光学系部を内部に固定する筐体とを備えていることを特徴としている。

本発明に係る屈折率修正装置は、レーザ装置部、光学系部、及びステージ部を同じ筐体の中に固定しているので、外部の振動の影響を受けずに、超短パルスレーザ光を光導波路デバイスの所定のコア部分に照射することができる。

【 0 0 2 6 】

また、本発明の屈折率修正装置の好適な実施態様では、屈折率を修正する光導波路デバイスの入出力端面に結合した光ファイバーから信号光を光導波路デバイスに導入し、光導波路デバイスから出力された信号光の出力値を測定してレーザ装置部にフィードバックし、超短パルスレーザ光の照射条件を調節してコア部分の屈折率変化量を制御する制御系を備え、光導波路デバイス内に信号光を導波させながら、超短パルスレーザ光を光導波路のコア部分に照射して、屈折率を修正する。

これにより、コア部分内で信号光を伝搬させつつデバイス特性をモニターしながら屈折率の修正を行い、最適値からのずれを検知してパルスレーザ光の照射条件にフィードバックすることで、屈折率の変化量を所望値に厳密に調整することができる。

【 0 0 2 7 】

3 0 ピコ秒以下の超短パルスレーザ光をコア部分に集光し、クラックや欠陥を発生させることなく高密度化し、低密度化し、又は空孔を形成して、コア部分の屈折率を修正することができる材料としては、好適には、例えばガラス状の無定形（非晶質）物質、又は高分子有機材料であるポリマーである。

【 0 0 2 8 】

高密度化され、低密度化され、または空孔が形成されたガラスは、ガラス転位点まで安定した形態で存在する。例えばシリカガラス（ SiO_2 ）の軟化点は1500℃であるので、通常の光導波路デバイスの使用環境である、0℃から100℃の範囲では、屈折率変動するようなことはない。従って、温度変化に対する光導波路デバイスの信頼性が向上する。

また、高分子を重合させてなるポリマーで形成した光導波路の場合は、ポリマーの高分子重合度や、構造、組成等が、超短パルスレーザ光の照射により変化することにより、屈折率に変化する。温度に対する屈折率の安定性は、ポリマーの

組成や重合度に依存し、例えばポリイミド系の材料の場合は200℃程度までは安定している。

その他、半導体の材料等でも、物質の状態が結晶では無く、アモルファス状態のコア材料であれば、本発明方法を適応することができる。

【0029】

シングルモードの光ファイバーのコア径は、コア部分とクラッド部分との屈折率差によって決るが、現在、使用されているものは7 μ mから10 μ m程度である。

光ファイバーと光導波路デバイスとを小さい結合損失で結合するためには、光導波路のコア径も光ファイバーと同程度にする必要があるものの、光導波路デバイスを集積化したり、光伝搬損失を抑制したりするためには、コア径を小さくする方が望ましいことがある。

そこで、光導波路デバイスの入出力端面のコア部分を含むクラッド部分の屈折率を超短パルスレーザ光を用いて上昇させ、テーパ状のコア部分を入出力端面に形成することにより、光ファイバーのコア径よりも細い光導波路デバイスのコア部分に光ファイバーを小さい結合損失で結合することができる。

【0030】

超短パルスレーザを用いて、光導波路のコア中に空孔を形成すれば、その部分の屈折率は1.0となるので、屈折率差が非常に大きくなる。従って、この空孔をコア中に規則的に配列することにより、回折効率の高いグレーティングを形成することが可能となる。

空孔の形状は、球状、楕円状であり、更には、照射条件を調整することにより、棒状にすることも可能である。空孔の形状と配置を調整することで、回折させる光の波長や方向を制御することができる。

【0031】

以上の知見に基づいて、本発明に係る光導波路デバイスは、コア部分クラッド部分が非晶質物質、又はポリマー物質で構成されている光導波路デバイス、シリコン基板上に製膜された厚さ100 μ m以下のガラス薄膜中に形成された光導波路デバイス、30 μ m以下の間隔で延在する複数本の光導波路を有する光導波路

デバイス、コア部分及びクラッド部分がガラス系材料で形成され、かつコア部分が GeO_2 を含まない光導波路デバイス、テーパ状に形成された形状のコア部分を備える光導波路デバイス、又はコア部分を伝搬している光を任意の方向に回折させるように形成されたグレーティングを備えている光導波路デバイスである。

そして、本発明に係る光導波路デバイスは、本発明に係る光導波路デバイスの屈折率の修正方法によって少なくともコア部分の屈折率を修正し、また、光ファイバーとの結合損失の小さいテーパ状のコア部分及び回折効率の高いグレーティングを形成することができる。

【0032】

【発明の実施の形態】

以下に、実施形態例及び実施例を挙げ、添付図面を参照して、本発明の実施の形態を具体的かつ詳細に説明する。

屈折率の修正方法の実施形態例

本実施形態例は、本発明に係る光導波路デバイスの屈折率の修正方法の実施形態の一例である。

本実施形態例は、シリカガラス基板上に設けられたクラッド部分内に、 GeO_2 をドーピングして形成したコア部分を有する埋め込み型光導波路デバイスの光導波路のコア部分の屈折率の修正方法であって、本実施形態例では、Ti:サファイヤレーザから発振される、パルス幅が30ピコ秒以下の超短パルスレーザ光をコア部分に集光しつつ、基板を動かしながらコア部分に沿って走査する。

これにより、精度よく、短時間で、コア部分の屈折率を修正し、屈折率が高く、しかも高い熱安定性の良好なコア部分を形成することができる。

【0033】

実施例1

本実施例は、実施形態例1の屈折率の修正方法の一例であって、図1は、シリカガラス基板1のクラッド部分中に GeO_2 をドーピングして形成した光導波路のコア部分2を有する埋め込み型光導波路デバイスの斜視図である。

光導波路デバイスのコア部分の屈折率 n は1.474であり、光導波路の幾何

学的素子長 l は $l = 30 \text{ mm}$ である。

パルス幅 150 フェムト秒 、パルスエネルギー $0.1 \mu\text{J}$ 、パルス繰り返し周波数 200 kHz 、波長 800 nm の超短パルスレーザ光 3 を $\text{Ti}:\text{サファイヤ}$ レーザから出射し、 50 倍の対物レンズ 4 を用いて光導波路のコア部分 2 の幅と同じ $7 \mu\text{m}$ のスポット径でコア部分 2 に集光し、基板を動かしつつコア部分 2 に沿って幾何学長 Δl の長さを 1 mm/s の走査速度で走査し、屈折率を修正した。

【0034】

屈折率を修正した後の光路長 L は、屈折率 n と幾何学的素子長 l との積と、屈折率変化率 Δn と幾何学長 Δl との積の和であって、式 (1) で表される。

$$\begin{aligned} L &= n(l - \Delta l) + (n + \Delta n) \Delta l \\ &= nl + \Delta n \Delta l \\ &= L_0 + \Delta L \end{aligned} \quad (1)$$

Δn は屈折率修正部分 5、つまり幾何学長 Δl の屈折率の変化量、 L_0 は修正前の光路長、 ΔL は修正により変化した光路長である。

【0035】

Δl として 1 mm の長さだけレーザ光を走査したところ、光路長 L は 44.220 mm から 44.222 mm に変化した。また、 Δl として 2 mm の長さだけレーザ光を走査したところ、光路長 L は 44.224 となった。また、走査距離、つまり Δl が 1 mm 増えると、光路長は 0.002 mm ずつ伸びていった。

実験結果を式 (1) に代入することにより、実施例 1 のパルスレーザ光条件で 1 mm/s の走査速度で修正したときの Δn は 0.002 であり、走査距離あたりの屈折率の変化は $0.002/\text{mm}$ であることがわかった。

また、パルス繰り返し周波数を 100 kHz とし、他の条件を同じ条件にして照射実験を試みたところ、走査距離あたりの屈折率の変化は、 $0.001/\text{mm}$ となった。

屈折率を修正した光導波路デバイスを 300°C に加熱し、 24 時間保持した後、常温に冷却し、再度、光路長を測定したところ、熱処理前と変化していないことがわかった。つまり、熱処理を施しても、修正した屈折率は変化しないことが

わかった。

【 0 0 3 6 】

レーザ光を照射してガラス中のコア部分の屈折率を変化させるためのしきい値のエネルギー密度は、パルス幅、レーザ光のパルスの繰り返し周波数、および波長によって変化した。そこで、この3つのパラメータを変化させて、屈折率の修正実験を図1で行った実験と同様に行った。

その結果、パルス幅を30ピコ秒以下に設定し、波長は349nm以上、パルス繰り返し周波数は10kHz以上に設定し、パルスのエネルギー密度を最適化することで、走査距離あたりの屈折率の変化量の大きさは変化したものの、コア部分の屈折率を図1の場合と同様に修正することができることを確認した。

尚、パルス幅は最低50フェムト秒まで確かめたが、それよりも短いパルスであっても、屈折率の修正は可能であると考えられる。また、波長範囲は1550nmまで、パルス繰り返しは200MHzまで確かめたが、それ以上であっても、屈折率の修正は可能であると考えられる。

【 0 0 3 7 】

比較例1

実施例1との比較のために、比較例1として、図1で行った場合と同じパルスエネルギー0.1 μ J、パルス繰り返し周波数200kHz、波長800nmの超短パルスレーザ光3を用い、実験構成と実験条件の下で、パルス幅を50ピコ秒に変化させて、レーザ光の照射実験を行ったところ、光導波路デバイスの光路長は変化していないこと、及び、照射したコア部分の屈折率も変化していないことがわかった。

そこで、レーザ光のパルスエネルギーを0.1 μ Jから徐々に上昇させたところ、0.7 μ Jに達した時点で、集光したコア部分は、屈折率が変化する以前に、誘電破壊が生じてしまい、屈折率を修正することができなかった。

【 0 0 3 8 】

次に、波長、レーザ光のパルス幅、パルスの繰り返し周波数、波長、およびレーザエネルギーの4つのパラメータを変化させて、屈折率の修正実験を実施例1と同様に行った。

その結果、パルス幅が30ピコ秒よりも長い場合は、他のパラメータをいくら最適化しても、コア部分の屈折率が変化する前に誘電破壊が生じてしまい、屈折率を修正することができなかった。尚、誘電破壊とは、熱の影響でランダムな方向にクラックが生じてしまう破壊を言う。

実施例1と比較例1との結果から、30ピコ秒以下のパルス幅の超短パルスレーザ光を照射することにより、コア部分の屈折率を修正することができるが、しかし、30ピコ秒よりも長いパルス幅の超短パルスレーザ光の照射では、コア部分の屈折率を修正することができないことを確認することができた。

【0039】

実施例2

本実施例は、請求項2に記載の屈折率の修正方法の具体的な実施例であって、以下に、図2を用いて本実施例を説明する。図2は、実施例1の光導波路デバイスのクラッド部分を形成するシリカガラス、及び、コア部分を形成する、 GeO_2 をドープしたシリカガラスのバンドギャップ・エネルギーを吸収スペクトルにより測定した結果を示す図である。

図2に示すように、ノンドープのシリカガラスのバンドギャップ6、及び GeO_2 ドープのシリカガラスのバンドギャップ7のエネルギーは、それぞれ、7.55 eV（バンドギャップ波長：165 nm）、及び7.13 eV（バンドギャップ波長：175 nm）であった。また、シリカガラスには、バンドギャップ・エネルギーが5 eV（250 nm）付近に欠陥バンド8が存在している。

【0040】

実施例1で用いたレーザ光の波長は800 nmであり、光子のエネルギーは1.55 eVである。そのため、図2中に示すように、価電子帯9から2光子過程では光の吸収は起こらず、3光子過程では欠陥バンドに到達するので、光のエネルギーが吸収される。

3光子吸収は、超短パルスレーザ光を集光して高エネルギー密度になった部分だけに生じるので、エネルギー密度が一番高い焦点を中心として焦点におけるビーム径程度の球状、もしくは楕円体形状の領域（集光点近傍）でのみ、屈折率が変化した。

【0041】

次に、実施例1で用いた波長800nmの超短パルスレーザー光の第2高調波である400nmのレーザー光を非線形光学素子で発生させ、パルスエネルギーを0.1μJとして、実施例1と同じ条件で屈折率の修正実験を行った。

図2より、波長400nmのレーザー光の光子エネルギーは3.11eVであり、3光子吸収でシリカガラスのバンドギャップのエネルギーである7.55eVに到達し、2光子吸収でも欠陥バンド8のバンドギャップである5eVに到達するため光の吸収が起こることがわかった。

実験の結果、3光子吸収および2光子吸収は、800nmの実験と同様レーザー光の集光点近傍にしか生じないため、この部分だけの屈折率が変化することがわかった。

400nmのレーザー光は、800nmのレーザー光と比較して、エネルギーが吸収され易いので、走査距離あたりの屈折率の変化量は0.003/mmとなり、800nmの場合の約1.5倍であった。

【0042】

150フェムト秒のパルス光を発生するTi:サファイヤレーザーは、波長が700nmから1000nmまでのレーザー光を可変で発生させることができるので、このレーザー光の第2及び第3高調波により、233nmから500nmのレーザー光を得ることができる。

そこで、実施例1と同じ実験条件で波長を短波長側に徐々に変化させて調べたところ、クラッド部分のバンドギャップ・エネルギーの1/2である、3.56eV以下のエネルギー（349nm以上）のレーザー光であれば、2光子吸収が生じて、シリカガラスのバンドギャップのエネルギーである7.55eVを越えず、3光子吸収により集光点近傍だけにレーザー光のエネルギーを吸収させることにより、又は欠陥への2光子吸収により、レーザー光のエネルギーを吸収させることにより、屈折率を変化させることができた。

【0043】

比較例2

実施例2との比較のために、比較例2の屈折率の修正方法を行った。比較例2

では、実施例 1 で用いた 8 0 0 n m の超短パルスレーザ光と、その第 2 高調波である 4 0 0 n m のレーザ光との混合を非線形光学素子で行い、8 0 0 n m の第 3 高調波となる 2 6 6 n m を得た。そして、パルスエネルギーを 0 . 1 μ J に設定し、1 5 0 フェムト秒のパルス幅を持つ波長 2 6 6 の超短パルスレーザ光を用いて、実施例 1 と同じ実験を試みた。

その結果、図 2 に示すように、2 6 6 n m の光の光子エネルギーは 4 . 6 8 e V であり、2 光子吸収でシリカガラスのバンドギャップ 6 を超え、また、1 光子吸収でも欠陥バンドによる吸収が生じた。そのため、レーザ光は集光点近傍だけではなく、光導波路デバイス中の光路全体に吸収されてしまい、集光点近傍のみで屈折率の変化を生じさせることが出来なかった。

【 0 0 4 4 】

そこで、パルスエネルギーを上昇させたところ、1 . 0 μ J に達した時点で集光部分に誘電破壊が生じた。また、4 0 0 n m の第 2 高調波である 2 0 0 n m で同じ実験を試みたところ、図 2 に示すように、光子エネルギーは 6 . 2 3 e V となり、1 光子吸収で欠陥バンドによる吸収、2 光子吸収ではバンドギャップを超えてしまうため、レーザ光が透過した光路全体に光が吸収されてしまい、2 6 6 n m の場合と同様に、集光点近傍領域の屈折率のみを変化させるようにすることが出来なかった。

実施例 2 と比較例 2 の結果から、屈折率を修正するためには、超短パルスレーザ光の波長は、3 4 9 n m 以上であることが必要である。

【 0 0 4 5 】

実施例 3

図 3 を用いて、請求項 3 に記載の屈折率の修正方法の実施形態を具体的に説明する。図 3 は、シリカガラス基板 1 のクラッド部分中に、GeO₂ をドープして光導波路のコア部分 2 を形成した光導波路デバイスの断面図であって、コアの断面は 7 μ m 角である。集光した超短パルスレーザの光路 1 0 とともに実施例 1 の屈折率修正部分 5 を図 3 の左側の図に示す。

5 0 倍の対物レンズで集光した 8 0 0 n m の波長の超短パルスレーザ光 1 1 による屈折率の修正領域は、コア部分だけであり、クラッド部分の屈折率は変化し

ていないことがわかった。

【 0 0 4 6 】

そこで、100倍の対物レンズで集光した800nmの波長の超短パルスレーザー光12で修正したところ、図3の中央の図に示すように、コア部分の1部分だけの屈折率を変化させることができた。この、コア部分の一部を修正した導波路から出射される導波光の透過ロスは1%以内であり、走査距離あたりの屈折率の変化量は0.0010/mmとなり、全体を修正した場合の50%であった。

波長を変化させて、同じ実験を試みたところ、355～1000nmの波長の範囲では、レーザー光のパルスエネルギー密度を、それぞれの波長におけるガラスの屈折率が増加するしきい値以上で、誘電破壊が生じるしきい値以下の範囲に調整することにより、コア部分の少なくとも一部分の屈折率を変化させることが可能であった。

【 0 0 4 7 】

比較例 3

実施例3との比較のために、比較例3の屈折率の修正方法を行った。比較例3では、実施例3と同じ実験で、50倍の対物レンズで集光した266nmの波長の超短パルスレーザー光13を用いて行った。

その結果、図3の右側の図に示すように、レーザー光の吸収する領域14は、光導波路デバイス中を透過する超短パルスレーザー光の光路全体となるため、集光した部分だけにエネルギーを集中させることができず、コア部分の屈折率を変化させることが出来なかった。

波長を変化させて実験を行ったところ、190nmから355nmの範囲の波長では、波長266nmの場合と同じように光路全体に光が吸収されてしまい、屈折率を変化させることができなかった。

実施例3と比較例3の結果から、コア部分の少なくとも一部の屈折率を修正するためには、超短パルスレーザー光の波長は、349nm以上であることが必要である。

【 0 0 4 8 】

実施例 4

図 4 を用いて、請求項 4 に記載の屈折率の修正方法の実施形態を具体的に説明する。図 4 は、シリカガラス基板 1 のクラッド中に、 GeO_2 をドーピングして光導波路のコア 2 を形成した光導波路デバイスの断面図である。コアの断面は $7\ \mu\text{m}$ 角である。

実施例 1 と同じレーザ光条件で、20 倍の対物レンズで集光した $800\ \text{nm}$ の波長の超短パルスレーザ光 15 による屈折率の修正領域は、コア部分の近傍領域を含む縦 $15\ \mu\text{m}$ 、横 $10\ \mu\text{m}$ の楕円体領域であった。

コア部分の周囲を含む領域を修正した導波路から出射される導波光の透過ロス は 2 % 以内であり、走査距離あたりの屈折率の変化量は $0.002/\text{mm}$ となり、コア部分だけを修正した場合と同程度であった。

【0049】

比較例 4

実施例 4 との比較のために、比較例 4 の屈折率の修正方法を行った。比較例 4 では、10 倍の対物レンズを用いて、実施例 4 と同じ実験条件を行ったところ、コア周辺の屈折率が修正される領域は、縦 $30\ \mu\text{m}$ 、横 $10\ \mu\text{m}$ の楕円体になり、修正後の導波光の透過ロスが修正前と比較して 5 % 以上増加してしまった。

比較例 4 では、10 倍の対物レンズを用いたことにより、レーザ光の入射角度が大きくなるために、楕円体の寸法が大きくなって、実施例 4 に比べて、導波光の透過ロスが増加したと考えられる。

【0050】

実施例 5

図 5 を用いて、請求項 5 に記載の屈折率の修正方法の実施形態を具体的に説明する。図 5 は、実施例 1 の条件で屈折率の修正を行った際の走査距離と走査回数による、光路長の変化を示すグラフである。

実施例 1 では、レーザ光を光導波路に沿って 1 回走査し、走査する距離により、屈折率の変化量を調整して光路長を制御する、屈折率の修正方法を示した。

本実施例では、同じコア部分を 2 回走査することにより、屈折率をさらに上昇させることができることがわかった。走査回数が増す度に屈折率は増加していったが、4 回目の走査では屈折率の変化に飽和が見られた。

つまり、図 5 に示すように、走査距離および走査回数を制御することで、光導波路の光路長を厳密に制御できることがわかった。

【0051】

比較例 5

実施例 5 との比較のために、比較例 5 の屈折率の修正方法を行った。比較例 5 では、実施例 1 と同じ条件で、レーザ光を走査しないで、径約 $7 \mu\text{m}$ の領域に継続してレーザ光を照射したところ、レーザ光が集光する直径約 $7 \mu\text{m}$ 角のコア部分の屈折率が僅かに変化した。そこで、更に照射を継続したところ、照射した部分の屈折率は 0.005 まで変化した、それ以上は変化しなかった。

この場合に变化した光路長 ΔL は、

$$\begin{aligned}\Delta L &= \Delta n \times \Delta l \\ &= 0.005 \times 0.01 = 0.00005 \text{ mm}\end{aligned}$$

となり、この実施例に用いた光導波路デバイスの光路長を修正するためには、不十分な屈折率の変化量であった。

本比較例は、屈折率を修正する際には、レーザ光を走査する方が、光路長を大きく変化させることが可能であり、かつ、走査回数を変化させることにより光路長の変化量を微少に調整できることを示している。

【0052】

実施例 6

図 6 を用いて、請求項 6 に記載の屈折率の修正方法の実施形態を説明する。図 6 は 3 層の光導波路層を積層してなる光導波路デバイス 16 の断面図である。

本光導波路では、クラッド部分はシリカガラス基板 1、コア部分 2 は GeO_2 をドープしたシリカガラスで形成されていて、コア部分の断面は $7 \times 7 \mu\text{m}$ 角であり、各導波路は $20 \mu\text{m}$ 間隔で形成されている。

実施例 1 と同じ条件で集光レンズに 50 倍の対物レンズ 4 を用いて 150 フェムト秒のパルス幅を持つ超短パルスレーザ光 3 の焦点を最下層のコア部分に合わせ、コア部分に沿って 1 mm/s の走査速度で 1 mm の距離を走査した。

その結果、レーザ光が透過した第 1 層目及び第 2 層目のコア部分の屈折率は変化せず、第 3 層目のコア部分 5 の屈折率だけを実施例 1 と同様に修正することが

できた。

【 0 0 5 3 】

比較例 6

実施例 6 との比較のために、比較例 6 の屈折率の修正方法を行った。比較例 6 では、集光レンズとして 2 0 倍の対物レンズを用いたことを除いて、実施例 6 と同じ条件で同様の屈折率の修正実験を行ったところ、屈折率が修正される領域は縦方向に 2 0 μ m と長くなってしまい、最下層のコア部分以外に、その上部のコア部分、及びコア部分の間のクラッド部分となるシリカガラスの屈折率も変化してしまった。

比較例 6 では、1 0 倍の対物レンズを用いたことにより、レーザー光の入射角度が大きくなり、実施例 6 と異なる結果になったと考えられる。

【 0 0 5 4 】

実施例 7

図 7 を用いて、請求項 7 に記載の屈折率の修正方法の実施形態を説明する。図 7 は、高密度化により屈折率が変化した光導波路のコア部分を示す、光導波路の平面的模式図である。

実施例 1 で屈折率を修正したコア部分のラマンスペクトルを顕微分光で測定したところ、シリカガラスが 3 % 高密度化された場合に観測されるピークのシフトが現れた。

これは、屈折率の変化がシリカガラスの高密度化に伴って生じていることを示している。図 7 に、高密度化により屈折率が変化した光導波路のコア部分 1 7 を示す。

【 0 0 5 5 】

比較例 7

実施例 7 との比較のために、比較例 7 の屈折率の修正方法を行った。比較例 7 では、実施例 1 の 1 5 0 フェムト秒に代えて、パルス幅が 1 0 0 ピコ秒のレーザー光を光導波路のコア部分に照射し、照射したコア部分のラマンスペクトルを測定したところ、照射前後で、ガラスを構成する S i と O の結合距離を示すピーク的位置が変化してしないことがわかった。

つまり、超短パルスレーザー光のパルス幅の長短によって、コア部分の密度が変化したり、変化しなかったりすることが確認できた。

【0056】

実施例 8

図 8 を用いて、請求項 8 に記載の屈折率の修正方法の実施形態を説明する。図 8 は、超短パルスレーザー光の照射により形成された、球状の空孔を有するコア部分、及び楕円体状の空孔を有するコア部分を、それぞれ、左側及び右側に示す模式図である。

本実施例では、実施例 1 と同じ光導波路デバイスの屈折率を修正するために、
Ti : サファイヤレーザーから出射される、パルス幅 150 フェムト秒、パルスエネルギー 0.5 μ J、パルス繰り返し周波数 1 kHz、及び波長 400 nm のレーザー光を用いた。

レーザー光を走査せず、光導波路のコア部分の中心に集光点が来るように、100 倍の対物レンズでレーザー光 18 を集光し、コア部分の中心を 1 発照射した。

その結果、図 8 に示すように、直径約 300 nm の球状の空孔 19 がコア中に形成された。

【0057】

また、同じ条件で、20 倍の対物レンズで集光した 400 nm の波長の超短パルスレーザー光 20 を用いて実験を試みたところ、幅 250 nm で長さが丁度コア部分を貫通する 7 μ m の円柱形の空孔 21 が形成された。

屈折率を修正した部分まで試料を研磨し、原子間力顕微鏡で表面を観察したところ、修正した部分は中空となっていることが確かめられ、修正部分の屈折率は 1.0 であることがわかった。

修正後の光導波路の透過ロス調べたところ、修正後の光導波路の透過ロスは、修正前と比較して殆ど変化していないことがわかった。

【0058】

レーザー光を照射して導波路のコア部分に空孔を形成するためのしきい値のエネルギー密度は、パルス幅、および波長によって変化した。そこで、この 2 つのパラメータを変化させて、屈折率の修正実験を図 8 の実験と同様に行った。

その結果、パルス幅を 3 0 ピコ秒以下、波長は 3 4 9 n m 以上に設定し、パルスのエネルギー密度を最適化することで、図 8 と同様にコア部分に空孔を形成することができた。

尚、パルス幅は最低 5 0 フェムト秒まで確かめたが、それよりも短いパルスであっても、屈折率の修正は可能であると考えられる。

また、波長範囲は 1 5 5 0 n m まで確かめたが、それ以上であっても、屈折率の修正は可能であると考えられる。パルス繰り返しは全て 1 k H z で行ったが、これ以上繰り返しが速いと、パルスを 1 発だけ取り出すためのシャッターの設定が困難であった。1 k H z 以下のパルス繰り返しであれば、シャッターを用いて容易に 1 発のパルスだけを取り出すことができる。

【 0 0 5 9 】

比較例 8

実施例 8 との比較のために、比較例 8 の屈折率の修正方法を行った。比較例 8 では、パルスエネルギーを $1.5 \mu\text{J}$ に設定して、実施例 8 と同じ 1 0 0 倍の対物レンズを用いて実験を行ったところ、非線形収束効果により、レーザ光の集光領域よりも手前のクラッド部分まで、球状の空孔が数個連なって形成されてしまった。この場合、屈折率修正後の光導波路の透過ロスが 2 % 増加した。

次に、パルス幅、波長、およびレーザエネルギーの 3 つのパラメータを変化させて、屈折率の修正実験を実施例 1 と同様に行った。その結果、パルス幅が 3 0 ピコ秒よりも長い場合は、他のパラメータをいくら最適化しても、コア部分に空孔が生じる前に誘電破壊が生じてしまい、空孔を形成することができなかった。

実施例 8 と比較例 8 との比較により、1 5 0 フェムト秒のパルス幅で、繰り返し 1 k H z、波長 4 0 0 n m のレーザ光を用いて空孔を設けて屈折率を修正するには、パルスエネルギーを $0.25 \mu\text{J}$ 以上 $1.5 \mu\text{J}$ 以下の範囲に調整することが必要であると判った。

また、3 0 ピコ秒よりも長いパルス幅のレーザ光の場合は、他のレーザパラメータを最適化しても、空孔を生じさせることができないことがわかった。

【 0 0 6 0 】

実施例 9

図 9 を用いて、請求項 9 に記載の屈折率の修正方法の実施形態を説明する。図 9 は、欠陥バンドを説明するバンドギャップ図である。

シリカガラスに GeO_2 をドープした光導波路のコア部分に、実施例 8 と同様の超短パルスレーザー光を 100 倍の対物レンズで集光して照射したところ、空孔の周辺に欠陥が生じ、図 9 に示すようにコア材料のバンドギャップ 22 の中に、欠陥バンド 23 が新たに形成されることが、スペクトル測定の結果わかった。

この欠陥バンド 23 には、400 nm の光の 3 光子吸収 24 で生成した自由電子 25 がトラップされ、トラップされた電子 26 が屈折率変化を引き起こすことがわかった。

【0061】

しかし、屈折率修正後に、光導波路デバイスを 200℃ で 1 時間加熱すると、トラップされた電子は価電子帯に緩和した。図 9 中に熱処理で緩和した電子 27 を示す。

この熱処理によりカラーセンターによる屈折率変化は消滅し、コア材料の密度変化による屈折率変化だけになることがわかった。熱処理後の光導波路デバイスは温度変化に対する信頼性が良く、0℃ から 100℃ の範囲ではデバイス特性が変化することはなかった。

【0062】

比較例 9

実施例 9 との比較のために、比較例 9 の屈折率の修正方法を行った。比較例 9 では、実施例 9 と同じ実験条件で、熱処理を施さないデバイスの温度変化に対する信頼性を評価するために、80℃ 以上の高温に保持したところ、光路長が変化してしまうことが判った。これは、熱により欠陥にトラップされていた電子が緩和して、屈折率が変わるからであると考えられる。

実施例 9 と比較例 9 との結果から、屈折率の修正を行った光導波路デバイスに熱処理を施すことにより、光導波路デバイスの高温環境使用に対する信頼性を高めることができる。なお、好ましい熱処理条件は、熱処理温度が 200℃ 以上 800℃ 以下で熱処理時間は 30 分間以上 10 時間以下である。

【0063】

屈折率修正装置の実施形態例

以下に、実施例を挙げ、添付図面を参照して、本発明に係る屈折率修正装置の実施の形態を具体的かつ詳細に説明する。

実施例 1 0

図 1 0 を用いて、請求項 1 0 に記載の屈折率修正装置の実施形態を説明する。

図 1 0 は本実施例の屈折率修正装置の構成を示す模式図である。

屈折率修正装置 3 3 は、図 1 0 に示すように、光導波路デバイス 2 8 を保持して、X 軸、Y 軸、及び Z 軸方法に移動できる可動ステージ部 2 9 と、3 0 ピコ秒以下のパルス光を出射するパルスレーザ装置部 3 0 と、パルスレーザ装置部 3 0 から出射されたレーザ光を光導波路デバイスのコア部分に導いて、コアの部分照射させる集光光学系部 3 1 と、可動ステージ部 2 9、パルスレーザ装置部 3 0、及び集光光学系部 3 1 を固定している筐体 3 2 とを備えている。

【 0 0 6 4 】

可動ステージ部 2 9 は、X 軸、Y 軸、Z 軸の各方向に最高 1 0 0 m m / s の速度で移動し、かつ $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 以下の誤差で位置決めされることができる。また、パルスレーザ装置部 3 0、及び集光光学系部 3 1 からなる光学系は、請求項 1 ～ 9 に記載の屈折率の修正方法に必要な超短パルスの集光照射が可能である。

本屈折率修正装置 3 3 は、可動ステージ部 2 9、パルスレーザ装置部 3 0、及び集光光学系部 3 1 を同一の筐体 3 2 に固定しているので、外部の振動の影響を受け難く、目的とする導波路のコア部分に沿って、正確にレーザビームを走査することができる。

本実施例の屈折率修正装置 3 3 を使ってコア部分の屈折率を修正した後の光導波路の光伝播ロスは、0.05 dB (1%) であり、修正前と比べて殆ど変化しなかった。

【 0 0 6 5 】

比較例 1 0

実施例 1 0 との比較のために、比較例 1 0 の屈折率修正装置で屈折率の修正を行った。比較例 1 0 の屈折率修正装置は、可動ステージ部 2 9、パルスレーザ装置部 3 0、及び集光光学系部 3 1 が筐体 3 2 に固定されていないことを除いて、

実施例 1 0 の屈折率修正装置 3 3 と同じ構成を備えている。

比較例 1 0 の屈折率修正装置を使って、実施例 1 0 と同じ条件で屈折率の修正を試みたところ、レーザビームの揺らぎが生じて、レーザビームを走査した際に屈折率の修正部分がぶれてしまうことがあり、修正した光導波路デバイスの光伝播ロスが 0.2 dB (約 5%) となって、実施例 1 0 と比較して、伝搬ロスが約 5 倍に増大した。

【0066】

実施例 1 1

図 1 1 を用いて、請求項 1 1 に記載の屈折率修正装置の実施形態を説明する。図 1 1 は、シリカガラス基板 1 のクラッド部分と、シリカガラスに GeO_2 がドーピングされた幅 $7\ \mu\text{m}$ のコア部分 2 で光導波路が形成された、マッハツェンダー型の干渉フィルター 3 4 の構成を示す模式図である。

干渉フィルター 3 4 は、複数個の干渉計を備え、1 本のファイバ中を伝播する多波長の光から各干渉計で強度が強くなる波長の光だけを分岐して各導波路に出力する。

光導波路デバイスの入出力面に予め光ファイバー 3 5 を結合し、図 1 0 に示す屈折率修正装置 3 2 を用いて各干渉計のコア部分の屈折率を修正して、所定の波長の光が干渉するように、各干渉計の光路長を調整した。

【0067】

光路長の調整の際、多波長光源 3 6 から出射された波長 $1.550\ \mu\text{m}$ から $1.558\ \mu\text{m}$ で $0.8\ \text{nm}$ 間隔の計 11 種類の光を光ファイバーで干渉フィルター 3 4 に入力し、分岐した各干渉計から出力された信号光を光スペクトルアナライザー 3 7 でモニターしながらレーザ光を照射した。

モニターした信号光の出力強度が最高値に達した時点で、レーザ光の走査および照射が自動的に終了するように光スペクトルアナライザーの信号を屈折率修正装置 3 3 のパルスレーザ装置部 3 0 のシャッターにフィードバックするようにシステムを構成した。

照射条件は実施例 1 と同じであって、パルスエネルギーを $0.05\ \mu\text{J}$ に設定し、 150 フェムト秒のパルス幅を持つレーザ光 3 をコア部分に沿って $1\ \text{mm}/$

s の走査速度で走査した。

その結果、各導波路とも3秒以内に最適値に屈折率を修正することが可能となり、分岐した光導波路路からは所定の波長の光を出力させることができた。出力側の光導波路と光ファイバーの結合をオイルマッチングとすることで、次に評価する光導波路と容易に結合させることができた。その結果、11本全ての干渉計の屈折率を最適値に修正するために要した時間は約5分であった。尚、オイルマッチングとは、ガラスの屈折率とほぼ同じオイルをファイバーと光導波路の隙間に充填してロス無く光を結合することである。

分岐した各導波路から出力される光の強度の合計から光導波損失を見積もったところ、0.1 dB (約2%) 以下であり、光導波損失が小さいことがわかった。

【0068】

比較例 1 1

実施例 1 1 との比較のために、比較例 1 1 では、実施例 1 1 と同じ条件で、信号光を導波させないで屈折率を修正し、その後、光ファイバーを接続して各干渉計の特性を評価しながら屈折率の修正を行った。

比較例 1 1 では、一つの干渉計を調整するのに2回以上の修正を必要とするために、10分程度の時間を要し、全ての導波路の特性を評価しながら屈折率を修正するためには、約100分の時間を要した。

実施例 1 1 と比較例 1 1 との比較は、信号光を導波させつつ屈折率を修正することの利点を強調している。

【0069】

実施例 1 2

図 1 2 を用いて、請求項 1 2 に記載の光導波路デバイスの実施形態を説明する。図 1 2 は、シリカガラス基板 1 上に製膜された屈折率が 1.500 のポリメタクリル酸メチル (PMMA) のポリマー薄膜 3 8 中に、このポリマーよりも屈折率が 0.001 大きな PMMA 誘導体のポリマーによって $7 \times 7 \mu\text{m}$ の導波路のコア 3 9 が形成されている、光導波路デバイスの構成を示す斜視図である。

このコア部分に、実施例 1 と同様に 150 フェムト秒のレーザ光を同じように

照射して 1 mm/s の走査速度で 1 mm の距離だけ走査した。パルスエネルギーは $0.02\text{ }\mu\text{ J}$ とした。

その結果、コア部分のポリマーは、重合率が増加して高密度化し、走査距離あたりの屈折率の変化量 $0.0015/\text{mm}$ で、屈折率を修正できることがわかった。

【0070】

実施例 13

図 13 を用いて、請求項 13 に記載の光導波路デバイスの実施形態を説明する。図 13 は、 0.5 mm 厚のシリコン基板 40 上に製膜した厚さ $20\text{ }\mu\text{ m}$ のシリカガラス薄膜 41 中に、 GeO_2 をドープしたシリカガラスで $7\times 7\text{ }\mu\text{ m}$ のコア部分 2 が形成された光導波路デバイスの構成を示す斜視図である。

この光導波路のコア部分 2 に、実施例 1 と同様の超短パルスレーザー光 3 を 100 倍の対物レンズで集光、走査することにより、実施例 1 と同様に屈折率を修正することができた。

また、シリコン基板から高さ $5\text{ }\mu\text{ m}$ 以上の上部に、光導波路のコア部分が形成されていれば、シリコン基板にダメージを与えることなく、コア部分の屈折率を修正できることがわかった。そして、走査距離及び走査回数と光路長との変化は、図 5 と同じ関係が得られた。

【0071】

実施例 14

図 14 を用いて、請求項 14 に記載の光導波路デバイスの実施形態を説明する。図 14 は、図 13 に示したシリコン上に製膜された厚さ約 $20\text{ }\mu\text{ m}$ のシリカガラス薄膜中に、 GeO_2 をドープしたシリカガラスにより幅 $7\text{ }\mu\text{ m}$ の光導波路のコア 2 が形成された波長分波用光導波路デバイス 42 の構成を示す斜視図である。

光導波路デバイス 42 は、1 本のファイバー中に伝搬する $1.550\text{ }\mu\text{ m}$ から $1.554\text{ }\mu\text{ m}$ で 0.4 nm 間隔の波長を持った多波長の光 43 から 0.4 nm 間隔の各波長に分波された出力 44 を得ることができる。それぞれの導波路の間隔は、最も広い部分でも $20\text{ }\mu\text{ m}$ と非常に狭い。

【 0 0 7 2 】

屈折率の修正を実施例 1 と同じ条件のレーザ光を用い、実施例 1 1 で述べたフィードバック機能を有する屈折率修正装置 3 3 を用いて、分岐した各光導波路から所定の波長の光が最大出力となるように、透過光をモニターしながら修正を行った。屈折率の修正領域 4 5 の導波路間隔が $20\ \mu\text{m}$ 以下でも、集光されるビームの直径は 1 0 0 倍の対物レンズを用いることにより、導波路幅と同じ $7\ \mu\text{m}$ に屈折率が変化する領域の寸法を調整することができた。

その結果、他の導波路に影響を与えることなく、各光導波路を所定の性能が得られる屈折率に調整することが可能であった。

【 0 0 7 3 】

実施例 1 5

図 1 5 を用いて、請求項 1 5 に記載の光導波路デバイスの実施形態を説明する。従来の技術で述べたように、超短パルスレーザ光をガラス中で走査することにより形成された光導波路は、ガラス中に GeO_2 をドープする必要がない。図 1 5 は、この方法でシリカガラス中に形成された光導波路デバイスの構成を示す斜視図である。

超短パルスレーザ光で直描された光導波路のコア部分 4 6 の屈折率を修正するために、実施例 1 と同様の実験を試みたところ、 GeO_2 をドープしたシリカガラスの場合と同様、屈折率を修正することができた。

また、超短パルスレーザ光で直描したコア部分のレーザ光による屈折率の修正は、屈折率が変化する部分とのボリウムマッチングが非常に良く、屈折率の修正による導波光のロスは殆ど生じないことがわかった。ここで、ボリウムマッチングとは、導波路の断面形状と屈折率が変化する領域の断面形状がどの程度一致するかを示す度合いを示す。

【 0 0 7 4 】

実施例 1 6

図 1 6 を用いて、請求項 1 6 に記載の光導波路デバイスの実施形態を説明する。図 1 6 は、図 1 3 に示したように、シリコン基板 4 0 上に製膜されたシリカガラス薄膜 4 1 中に GeO_2 をドープして形成された、幾何学的素子長 $20\ \text{mm}$ の

光導波路のコア部分 2 を含む光導波路デバイスの断面図である。コア部分は $5\ \mu\text{m}$ 角に形成されている。

図 3 及び図 4 で示したように、超短パルスレーザ 3 で屈折率を修正する領域は、集光レンズや入力するレーザパワーを調整することにより、コアの一部分やコアの周囲を含む領域に変化させることができる。

【0075】

そこで、光源として実施例 1 と同じレーザ光を用い、図 1 6 に示すように、50 倍の対物レンズで集光したレーザ光を照射し、レーザ光の平均パワーを 30 mW から 10 mW に変化させながら、信号光が入出力するコア端面部分から導波路に沿って、 1 mm/s の走査速度で 10 mm の長さを走査した。

【0076】

その結果、コア部分を含む近傍領域の屈折率が修正され、図 1 6 に示すように、入出力端面はコア径が $8\ \mu\text{m}$ 、屈折率を修正した領域の終端は径約 $5\ \mu\text{m}$ であって、光導波路のコア径と一致した。

このように、スポットサイズ変換光導波路 4 7 になる屈折率修正部分 4 に、コア径が $7\ \mu\text{m}$ の光ファイバーを結合し、伝搬ロスを測定したところ 0.1 dB (約 2%) 以下であった。

この結果、入出力端面のコア部分をテーパ形状に修正することにより、異なるコア径の光ファイバーと光導波路をロス無く結合することができることがわかった。

【0077】

実施例 1 7

図 1 7 を用いて、請求項 1 7 に記載の光導波路デバイスの実施形態を説明する。図 1 7 は、空孔によるグレーティングを用いた T 字分岐型光導波路デバイスの平面図であって、シリコン基板上に形成したシリカガラス薄膜 4 1 中に GeO_2 をドープした光導波路のコア部分 2 が T 字状に形成されており、屈折率修正部分は拡大斜視図で示している。

本実施例では、実施例 8 で使った 1 kHz で 400 nm のレーザ光を 20 倍の対物レンズで T 字状の分岐部分に集光して、径 250 nm で長さ $7\ \mu\text{m}$ の円柱状

の空孔を形成した。空孔は、図17の下部に示すように、ブラッグの条件 ($\lambda = 2d \sin \theta$) を満たすように形成されている。

即ち、コア部分2中の波長 λ は λ/n であり、 n はコアの屈折率で1.475であり、入力する波長 λ_1 、 λ_2 は、それぞれ、1.550 μm と1.300 μm であるとする、そのうち1.550 μm の波長だけを回折させるための定数 d は、式(2)で計算され、

$$d = \lambda / (n \cdot 2 \sin 45^\circ) = 743 \text{ nm} \quad (2)$$

となる。

【0078】

そこで、図17の下図に示す d の間隔を743 nmに設定し、棒状の空孔を約500 nm間隔の配列で形成した。そして2波長の光をそれぞれ入力したところ、1.550 μm の信号光は、入力の15%がグレーティングにより垂直方向に回折して、分岐した導波路から出射された。一方、透過した1.300 μm の透過ロスが1%以内であった。

また、 d の間隔を623 nmにすることで、波長1.300 μm の光を垂直方向に回折させ、分岐した光導波路から出力することができ、この場合の回折効率も15%であった。

【0079】

図18は、シリコン基板40上のシリカガラス薄膜41中に GeO_2 がドーピングされた光導波路のコア部分2が形成されている、光導波路の断面を横から見た図である。コア部分2中に、図17でグレーティングを形成したときと同じレーザー光3を斜め方向から照射し、45°傾いた空孔を形成した。空孔の間隔は波長1.550 μm の光が回折するように設定した。

1.550 μm と1.300 μm の光を伝搬させたところ、1.550 μm の光の10%がコア部分2から上方向に回折し、クラッド部分を透過し光導波路デバイスの表面から出射した。一方、1.300 μm の信号光は、1%以下の光がコア部分2から上方に回折し、クラッド部分を透過し光導波路デバイスの表面から出射した。

【0080】

【発明の効果】

本発明方法により、光導波路デバイスの光を導波するコア部分の屈折率を精度よく修正することが可能となり、信頼性の高い、高性能な光導波路デバイスを製造することができる。

本発明により屈折率が修正された光導波路デバイスを、光通信システムに応用することにより、信頼性の高い大容量高速光通信が実現され、情報通信産業の発展に大きく貢献することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

超短パルスレーザによる光導波路デバイスのコア部分の屈折率の修正方法を説明する、埋め込み型の光導波路の斜視図である。

【図 2】

シリカガラスおよびGeをドーピングしたシリカガラスのバンドギャップと、各波長の光における吸収を説明する図である。

【図 3】

超短パルスレーザの波長と屈折率の変化する領域を示す、光導波路デバイスの断面図である。

【図 4】

コア周辺のクラッド部分を含んだ屈折率の修正を説明する、光導波路デバイスの断面図である。

【図 5】

実施例 1 の条件で屈折率の修正を行った際の超短パルスレーザの走査距離と走査回数による、光路長の変化を示すグラフである。

【図 6】

3次元で形成された光導波路デバイスの下層のコア部分の屈折率の修正を説明する、3層に積層された光導波路デバイス 16 の断面図である。

【図 7】

高密度化により屈折率が変化した光導波路のコア部分を示す、光導波路の平面的模式図である。

【図 8】

空孔による屈折率の修正を説明するために、左側及び右側に、それぞれ、パルスレーザ光による照射の結果形成された、球状の空孔を有するコア部分、及び楕円体状の空孔を有するコア部分を示す模式図である。

【図 9】

熱処理によるカラーセンターの緩和を説明するために、欠陥バンドの形成を示すバンドギャップ図である。

【図 1 0】

レーザ発振器、集光光学系、及び試料ステージが一体となった、光導波路の屈折率修正装置の構成を示す模式図である。

【図 1 1】

導波路デバイスの透過光強度を超短パルスレーザ光の照射パラメータにフィードバックさせた光導波路の屈折率修正装置の構成を示す模式図である。

【図 1 2】

シリカガラス上に形成されたポリマー樹脂薄膜中の光導波路のコア部分の屈折率を、超短パルスレーザ光で修正した光導波路デバイスの斜視図である。

【図 1 3】

シリコン基板上に製膜されたシリカガラス中の Ge がドーピングされた光導波路のコア部分の屈折率を、超短パルスレーザ光で修正した光導波路デバイスの斜視図である。

【図 1 4】

導波路間隔が $20\ \mu\text{m}$ 以下のコア部分の屈折率を、超短パルスレーザ光で個別に修正した光導波路デバイスの平面的模式図である。

【図 1 5】

超短パルスレーザで直描した光導波路のコア部分の屈折率を、超短パルスレーザ光で修正した光導波路デバイスの斜視図である。

【図 1 6】

コアの入出力部分にテーパを設けた光導波路デバイスの模式的断面図である。

【図 1 7】

空孔によるグレーティングを用いた T 字分岐型光導波路デバイスの平面図であ
って、屈折率修正部分は拡大斜視図で示している。

【図 1 8】

空孔によるグレーティングを用いた上部反射型光導波路デバイスの断面図であ
る。

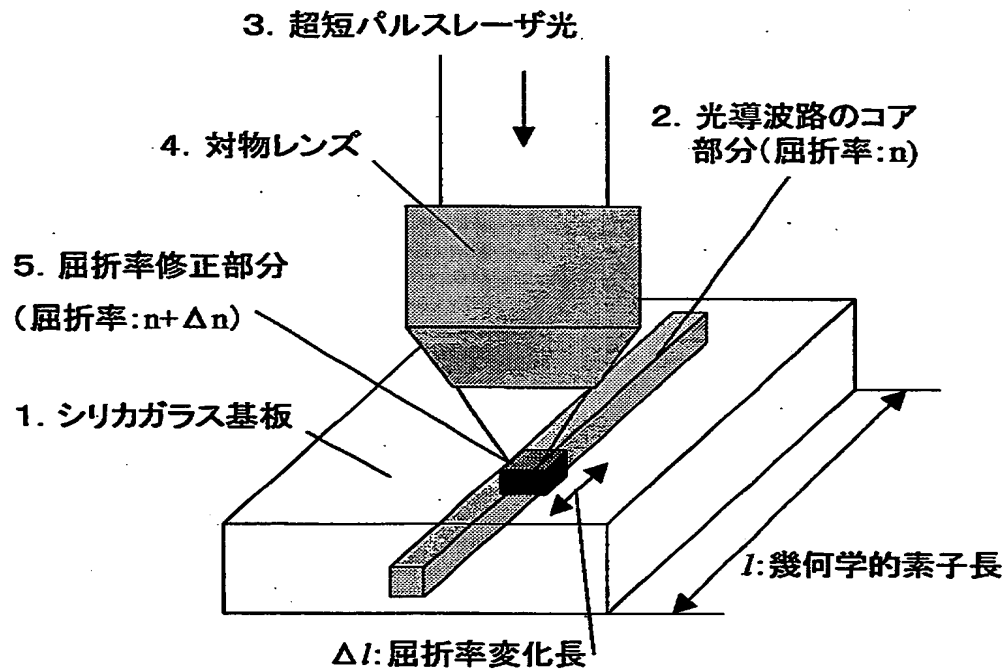
【符号の説明】

- 1 シリカガラス基板
- 2 光導波路のコア部分
- 3 超短パルスレーザ
- 4 対物レンズ
- 5 屈折率修正部分
- 6 シリカガラスのバンドギャップ
- 7 GeO_2 ドープガラスのバンドギャップ
- 8 シリカガラスの欠陥バンド
- 9 価電子帯
- 1 0 超短パルスレーザの光路
- 1 1 5 0 倍の対物レンズで集光した 8 0 0 n m の波長の超短パルスレーザ光
- 1 2 1 0 0 倍の対物レンズで集光した 8 0 0 n m の波長の超短パルスレーザ
光
- 1 3 5 0 倍の対物レンズで集光した 2 6 6 n m の波長の超短パルスレーザ光
- 1 4 レーザ光の吸収領域
- 1 5 2 0 倍の対物レンズで集光した 8 0 0 n m の波長の超短パルスレーザ光
- 1 6 3 層光導波路デバイス
- 1 7 高密度化により屈折率に変化した光導波路のコア部分
- 1 8 1 0 0 倍の対物レンズで集光した 4 0 0 n m の波長の超短パルスレーザ
光
- 1 9 球状の空孔
- 2 0 2 0 倍の対物レンズで集光した 4 0 0 n m の波長の超短パルスレーザ光

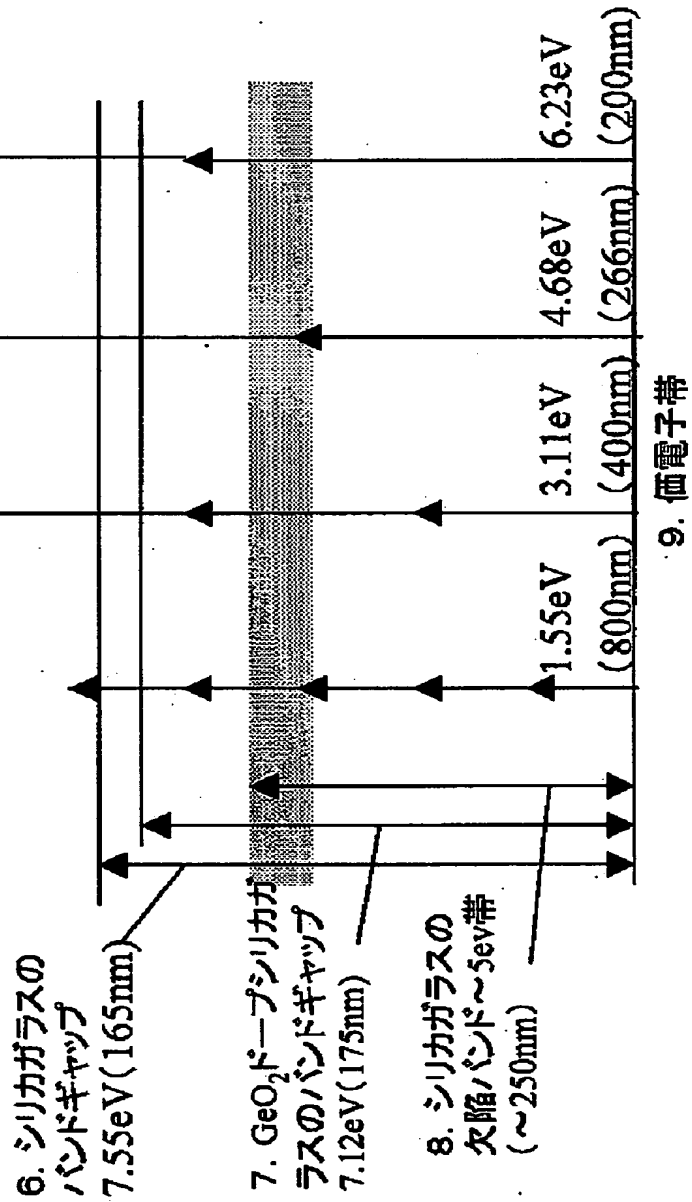
- 2 1 楕円体形状の空孔
- 2 2 コア材料のバンドギャップ
- 2 3 超短パルスレーザー照射で生じた欠陥バンド

【書類名】 図面

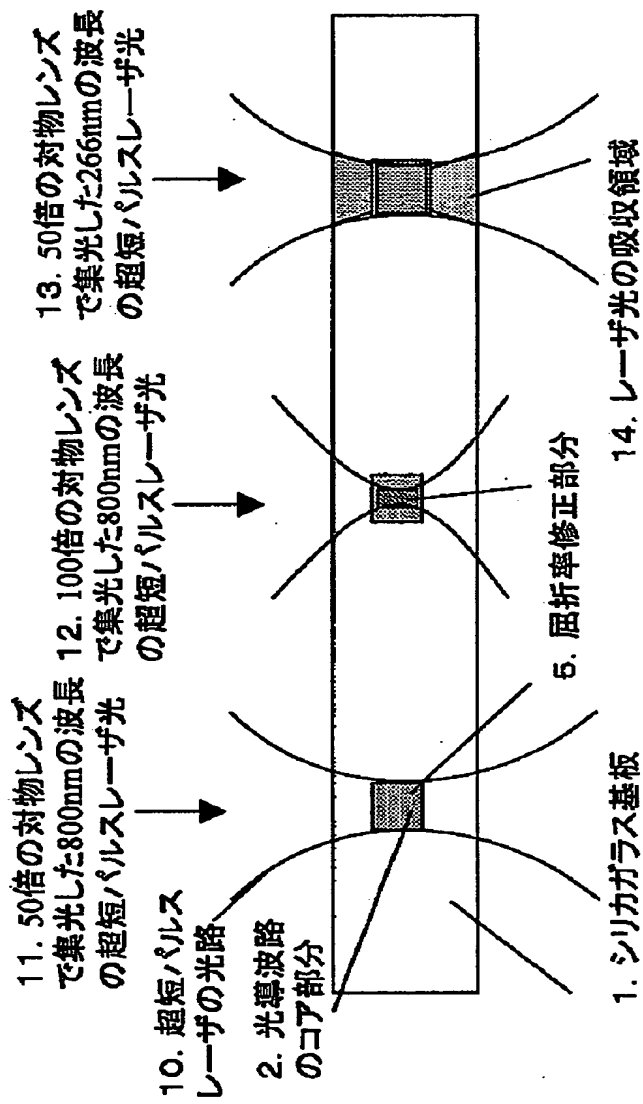
【図 1】



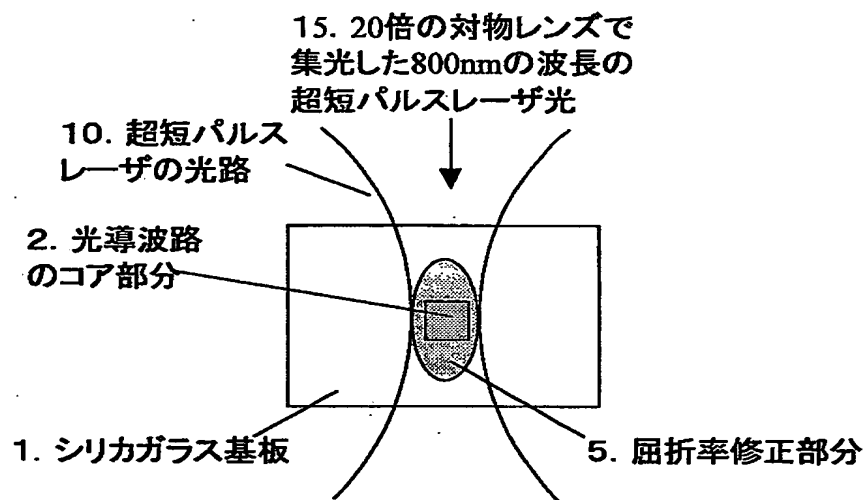
【図 2】



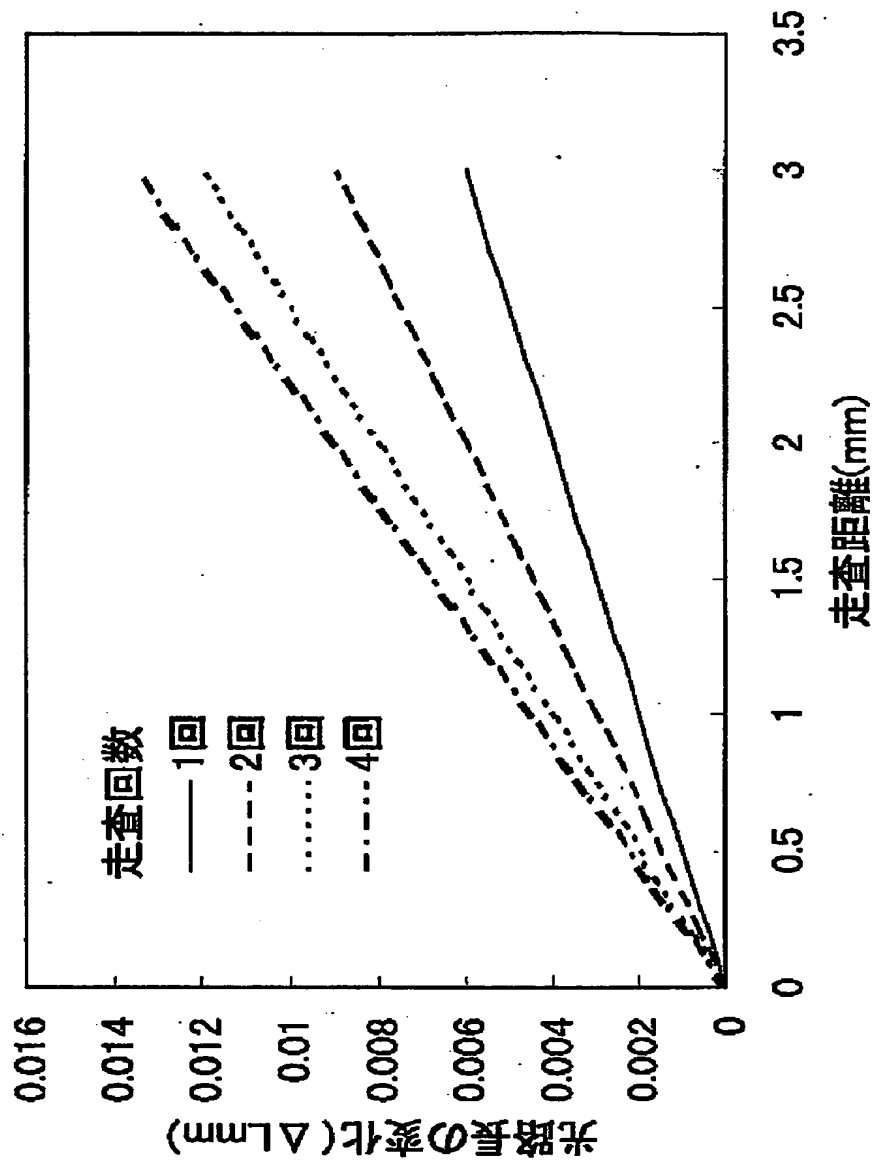
【図 3】



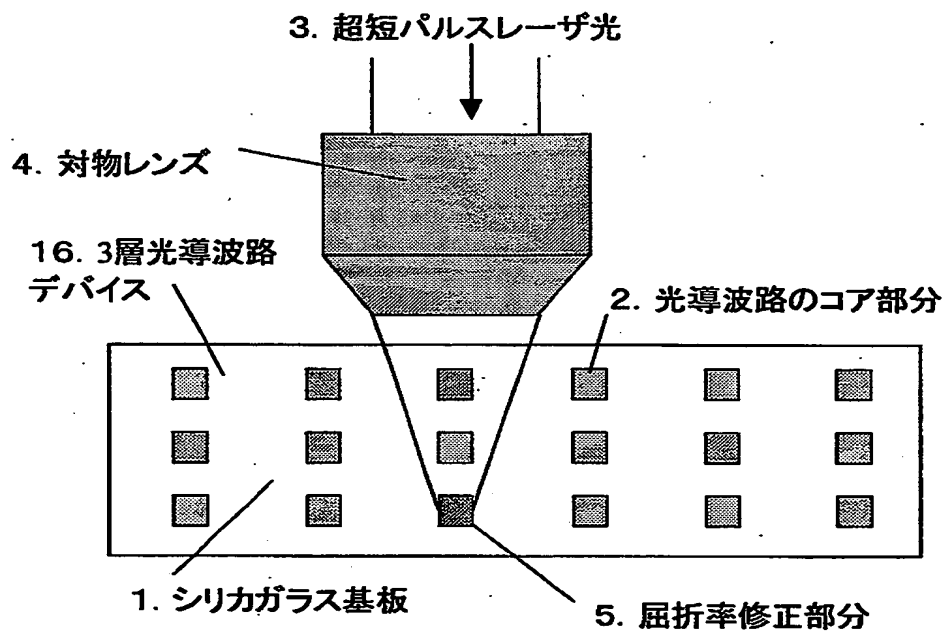
【図 4】



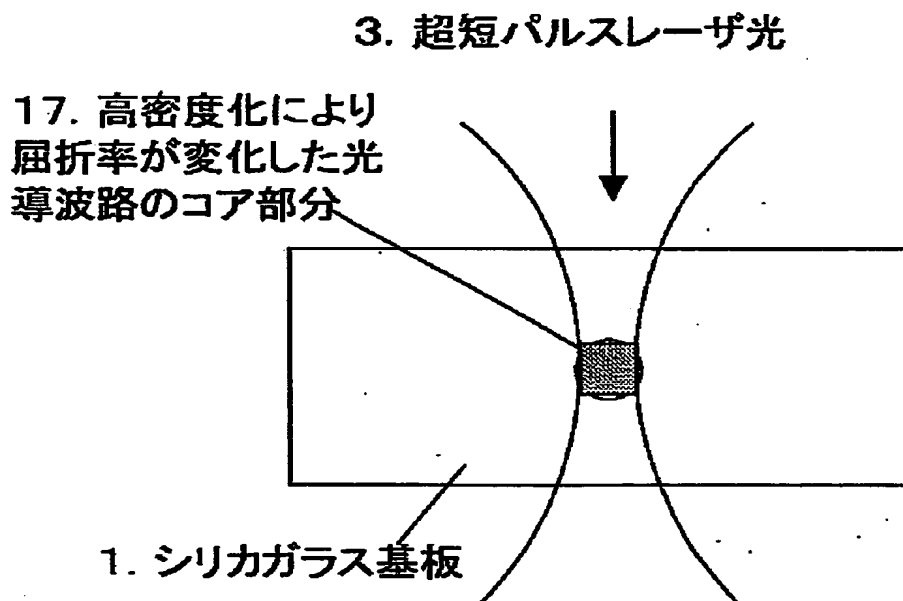
【図 5】



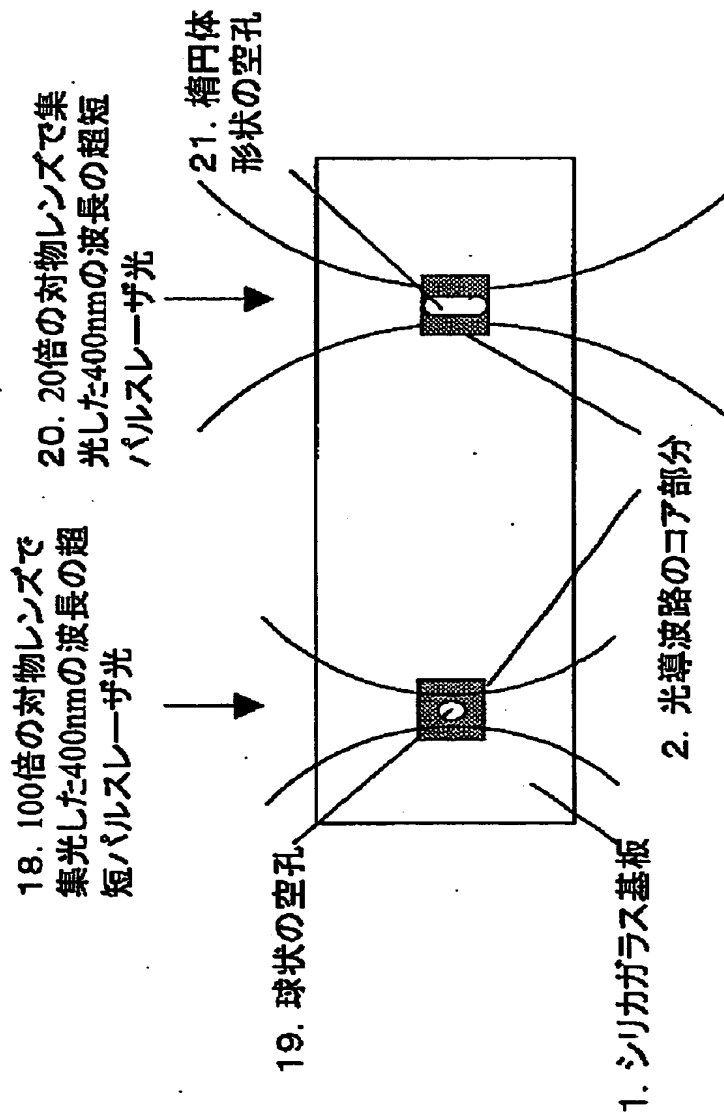
【図 6】



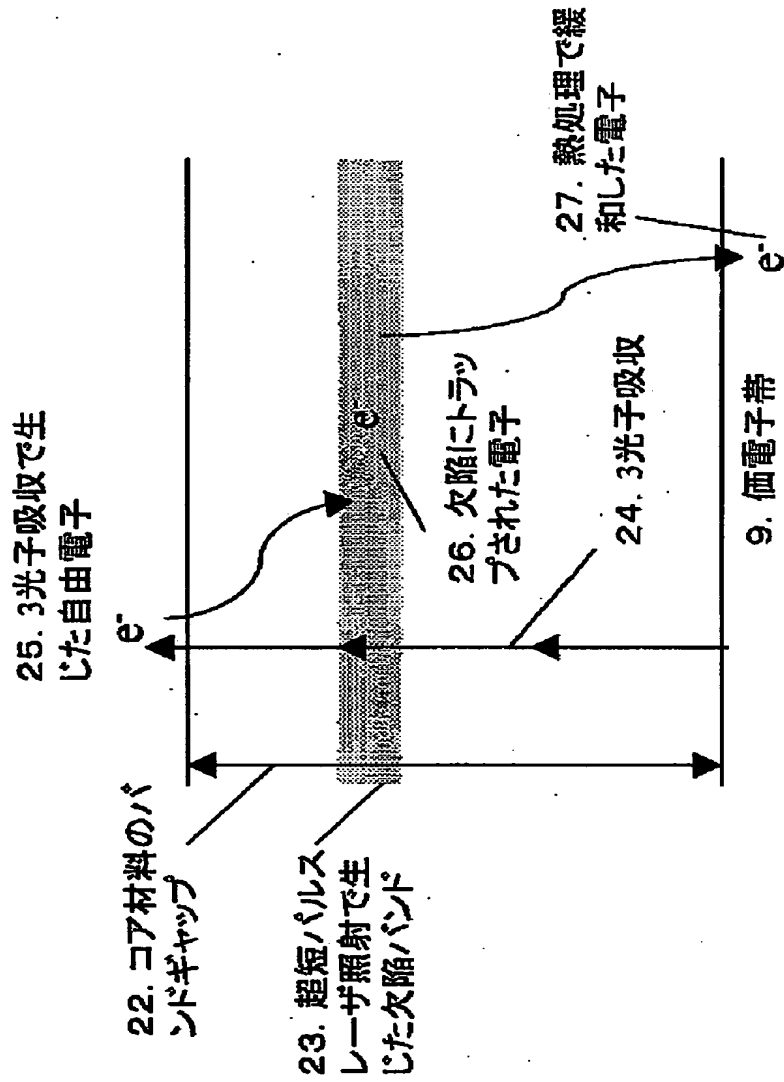
【図 7】



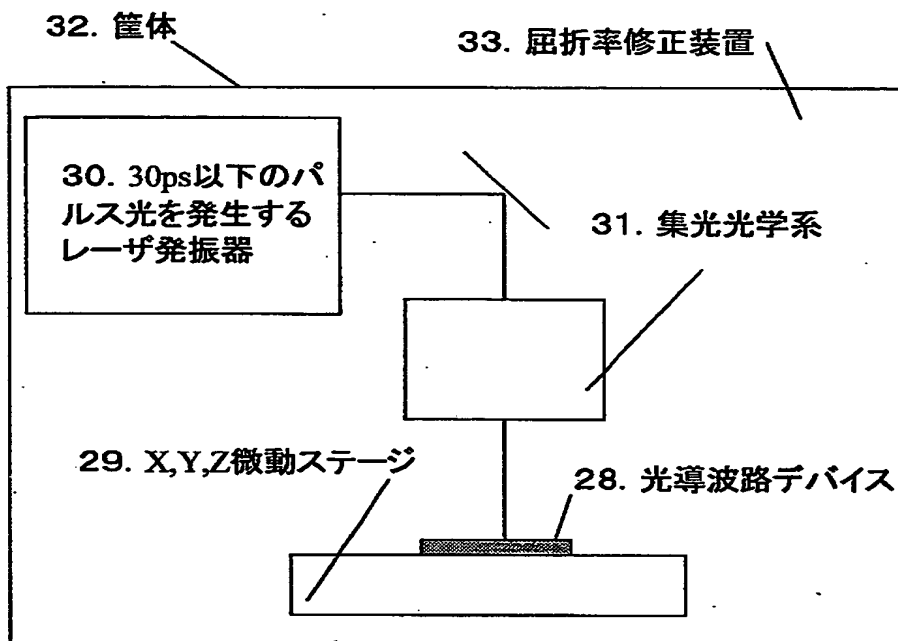
【図 8】



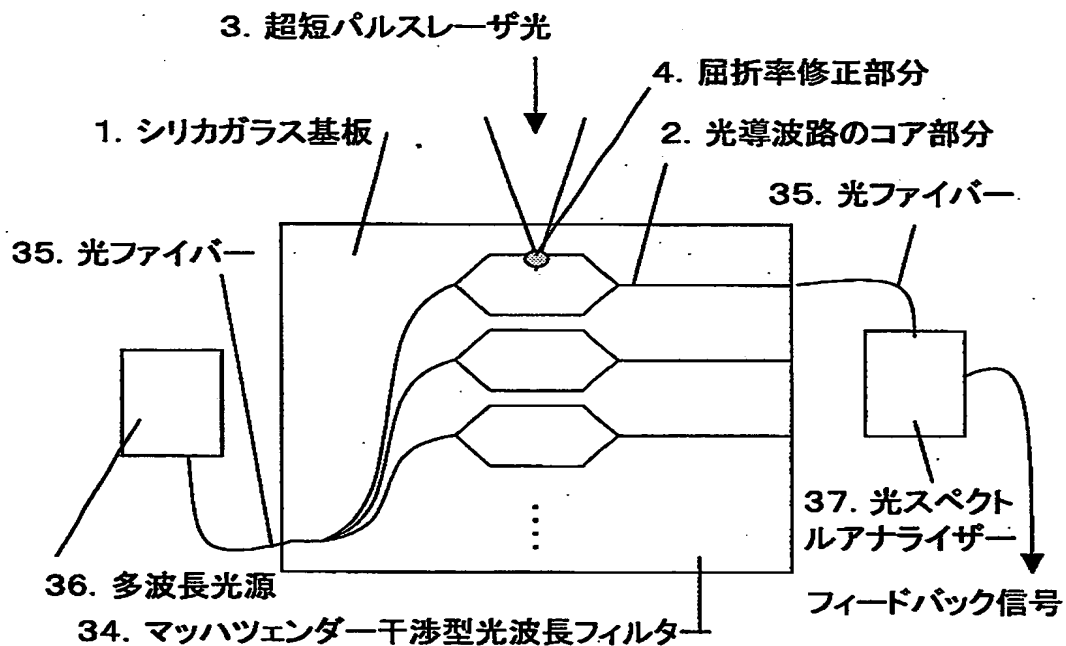
【図9】



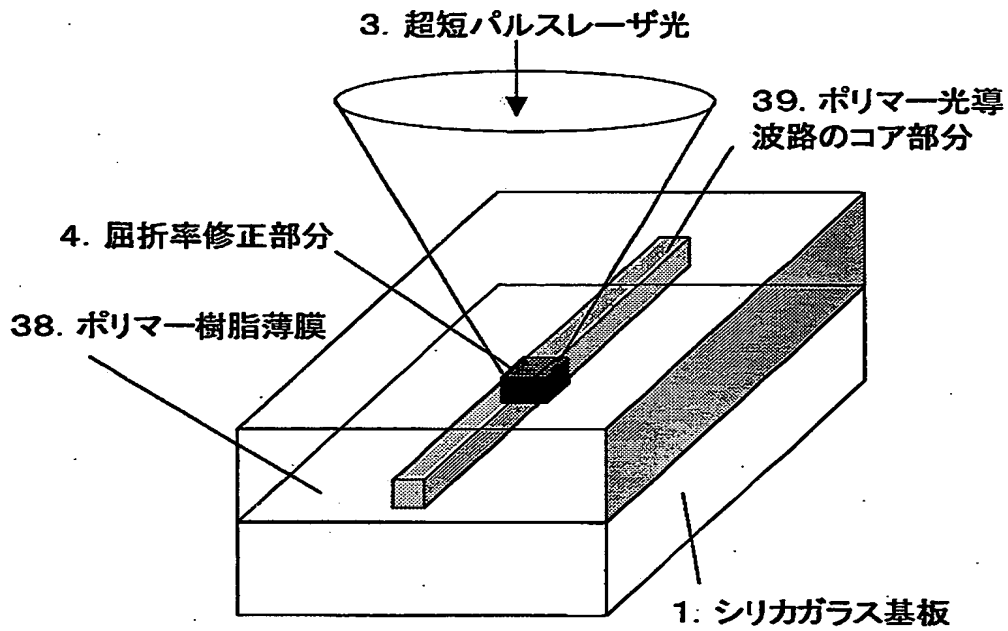
【図 1 0】



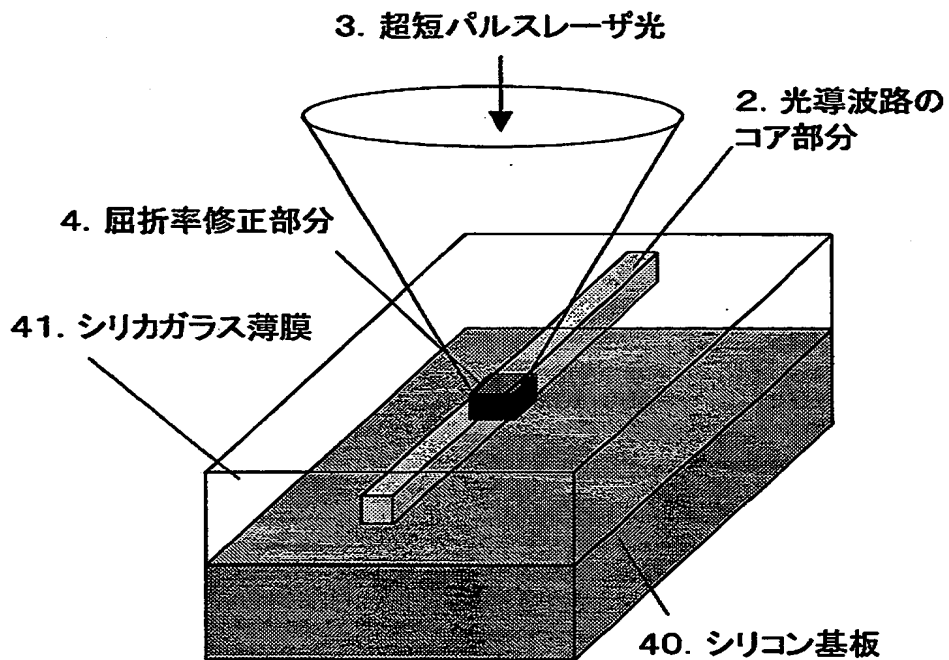
【図 1 1】



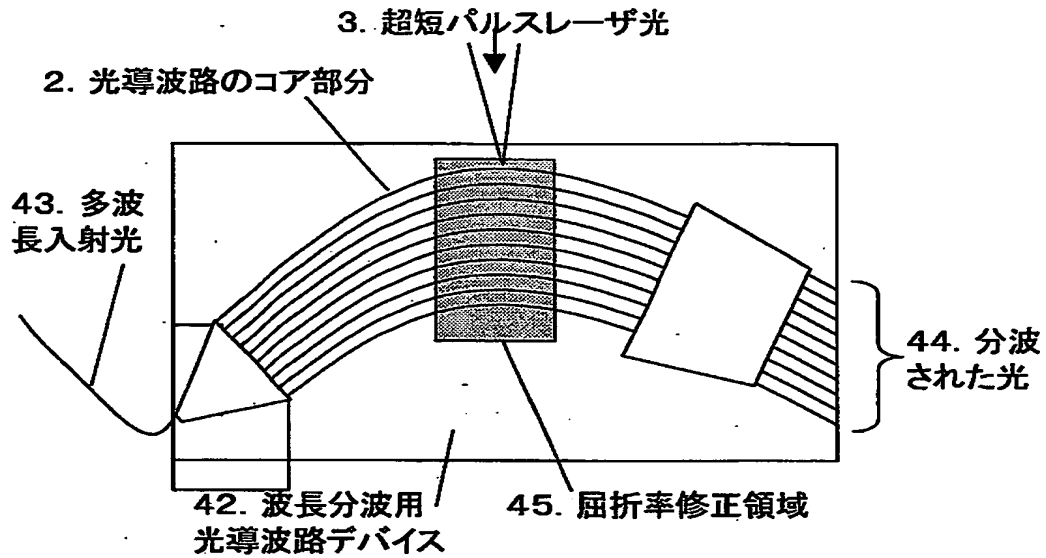
【図 1 2】



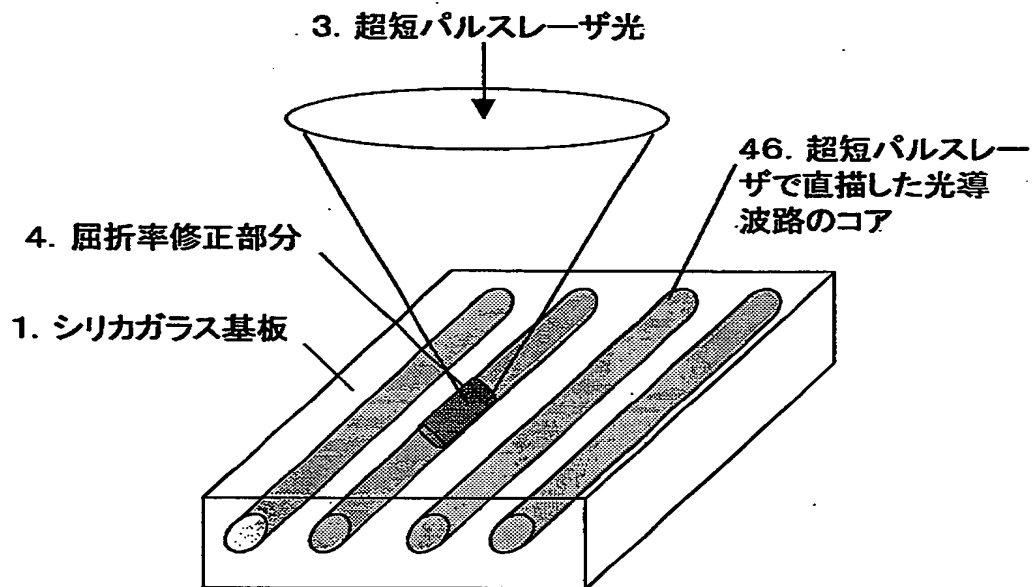
【図 1 3】



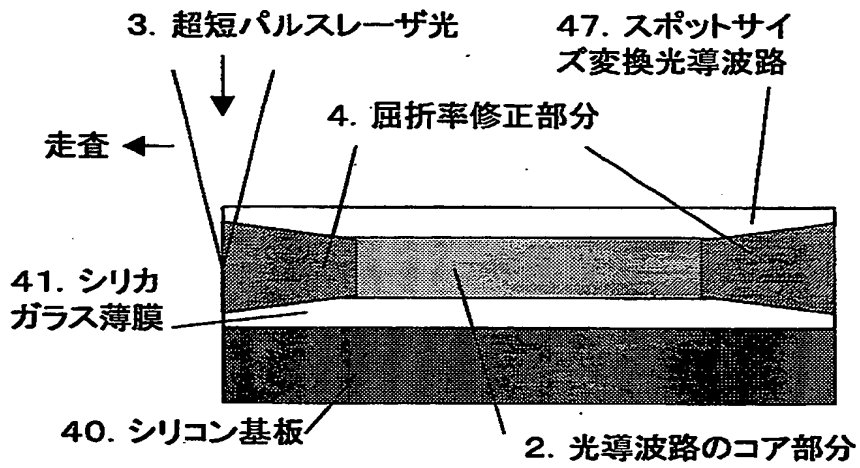
【図14】



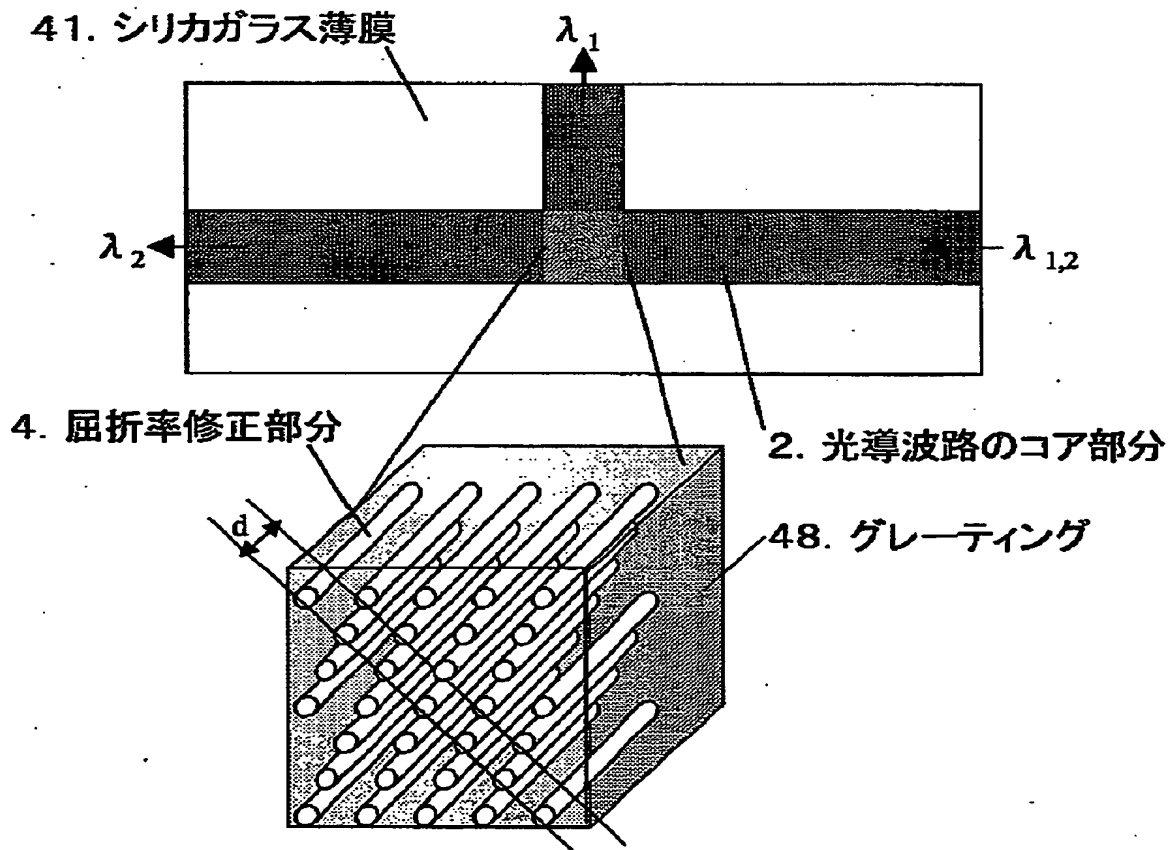
【図15】



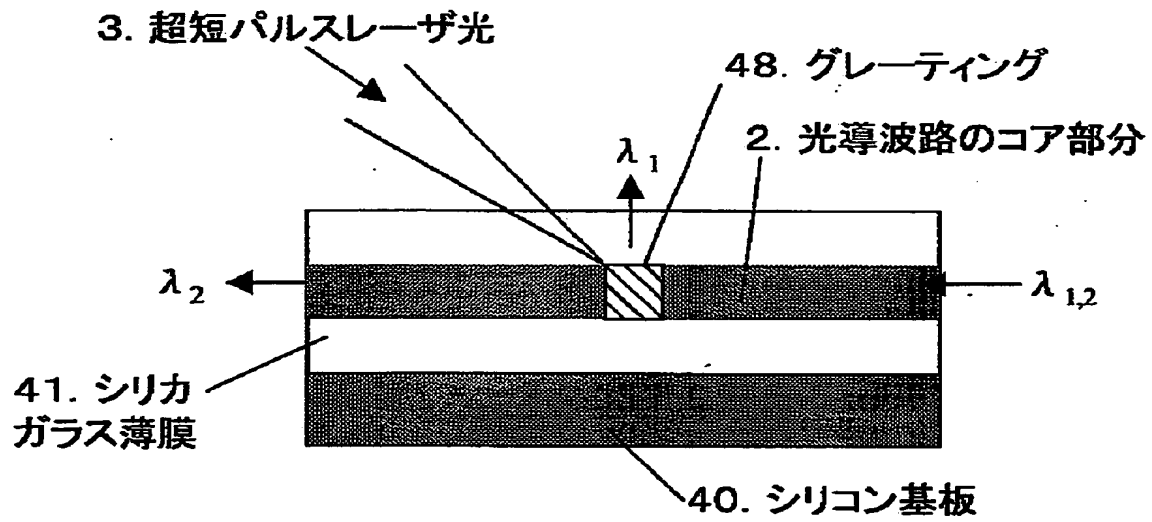
【図16】



【図17】



【図 1 8】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 光導波路デバイスのコア部分の屈折率を高精度で修正してデバイス特性を向上させ、また、長期信頼性のある光導波路デバイスを作製するための、屈折率の修正方法を提供する。

【解決手段】 本屈折率の修正方法は、光導波路デバイスの屈折率を修正する方法であって、シリカガラス基板 1 上に形成された光導波路のコア部分 2 に 30 ピコ秒以下のパルス幅を持つ超短パルスレーザ光 3 を照射して、コア部分の屈折率を変化させ、屈折率が修正されたコア部分 5 を形成する。好適には、照射する超短パルスレーザ光の光子のエネルギーが、光導波路デバイスを形成するクラッド材料のバンドギャップエネルギーの $1/2$ よりも低いようにする。

【選択図】 図 1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [0 0 0 0 0 4 2 3 7]

1. 変更年月日 1 9 9 0 年 8 月 2 9 日

[変更理由] 新規登録

住 所 東京都港区芝五丁目 7 番 1 号

氏 名 日本電気株式会社